

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ  
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

VLASTNOSTI BIOKOMPOZITŮ NA BÁZI LNĚNÝCH VLÁKEN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARKÉTA PELÁNOVÁ

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ  
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ  
FACULTY OF CHEMISTRY  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

# VLASTNOSTI BIOKOMPOZITŮ NA BÁZI LNĚNÝCH VLÁKEN

PROPERTIES OF BIOCOMPOSITES BASED ON FLAX FIBERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARKÉTA PELÁNOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Mgr. RADEK PŘIKRYL, Ph.D.

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně  
**Fakulta chemická**  
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

## Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce:	<b>FCH-BAK0853/2014</b>	Akademický rok: <b>2014/2015</b>
Ústav:	Ústav chemie materiálů	
Student(ka):	<b>Markéta Pelánová</b>	
Studijní program:	Chemie a chemické technologie (B2801)	
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808R016)	
Vedoucí práce	<b>Mgr. Radek Přikryl, Ph.D.</b>	
Konzultanti:		

### Název bakalářské práce:

Vlastnosti biokompozitů na bázi lněných vláken

### Zadání bakalářské práce:

Studium vlastností biokompozitů na bázi lněných vláken s ohledem na biodegradabilitu a hydrolytickou stabilitu. Porovnání vlivu kompatibilizace povrchu vláken a matrice na studované vlastnosti.

### Termín odevzdání bakalářské práce: 22.5.2015

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

-----  
Markéta Pelánová  
Student(ka)

-----  
Mgr. Radek Přikryl, Ph.D.  
Vedoucí práce

-----  
prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.  
Ředitel ústavu

V Brně, dne 30.1.2015

-----  
prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce je zaměřena na kompozity, které jsou tvořené degradovatelnými složkami. Teoretická část se zabývá problematikou kompozitních materiálů, úpravami vláken a vlastnostmi. Účelem této práce je vytvořit kompozit tvořený polyhydroxybutyrátem, který je vyztužen lněnými vlákny s různými úpravami. Dále byl posouzen vliv vyztužujících vláken v kompozitním materiálu na tahové vlastnosti, hydrolytickou stabilitu a rozložitelnost kompozitu v kompostu v laboratorních podmínkách.

## **ABSTRACT**

This thesis is focused on composites, which are composed of degradable components. The theoretical part deals with composite materials, treatment of fibers and properties of composites. The purpose of this study is to create a composite consisting of polyhydroxybutyrate, which is reinforced with flax fibers with various modifications. The thesis also evaluates the effect of reinforcing fibers in the composite material on the tensile properties and hydrolytic stability and degradability of the composite in compost in laboratory conditions.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Kompozity, přírodní vlákna, polyhydroxybutyrát, biodegradabilita

## **KEYWORDS**

Composites, natural fibers, polyhydroxybutyrate, biodegradability

PELÁNOVÁ, M. *Vlastnosti biokompozitů na bázi lněných vláken*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2015. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Mgr. Radek Přikryl, Ph.D..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

## Poděkování

*Tímto bych chtěla poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Mgr. Radku Přikrylovi, Ph.D. za ochotu, trpělivost, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování bakalářské práce. Dále bych také velmi ráda poděkovala Ing. Petře Matouškové za pomoc při provádění experimentu.*

## OBSAH

1	Úvod .....	7
2	Teoretická část.....	8
2.1	Kompozitní materiály .....	8
2.1.1	Částicové výztuže.....	9
2.1.2	Vláknové výztuže.....	9
2.2	Anorganická vlákna.....	10
2.2.1	Skleněná vlákna.....	10
2.2.2	Uhlíková vlákna .....	10
2.3	Přírodní vlákna .....	11
2.3.1	Lněná vlákna .....	11
2.3.2	Jutová vlákna.....	11
2.3.3	Konopná vlákna.....	11
2.4	Způsoby kompatibilizace přírodních vláken .....	12
2.4.1	Fyzikální úpravy.....	12
2.4.2	Chemické úpravy.....	12
2.5	Matrice.....	13
2.5.1	Termosety (Reaktoplasty) .....	14
2.5.2	Termoplasty.....	14
2.6	Vlastnosti .....	15
2.6.1	Biodegradabilita .....	16
2.6.2	Nasákavost vodou (ASTM D-570) .....	17
2.6.3	Hydrolytická stabilita .....	17
2.6.4	Tahová zkouška (ASTM D-638, ISO 527) .....	17
3	Experimentální část .....	18
3.1	Použité materiály .....	18
3.1.1	PHB .....	18
3.1.2	Vlákna .....	18
3.1.3	$\gamma$ -Glycidoxypropyltrimethoxysilan .....	18
3.1.4	$\gamma$ -Methakryloxypropyltrimethoxysilan .....	18
3.2	Úprava vláken.....	19
3.2.1	Mercerizace .....	19
3.2.2	Silanizace .....	19

3.3	Výroba kompozitu .....	20
3.4	Nasákavost vodou.....	20
3.5	Pevnost v tahu.....	21
3.5.1	Příprava vzorků .....	21
3.5.2	Stanovení pevnosti v tahu .....	21
3.6	Kompostování.....	21
3.6.1	Základní princip .....	21
3.6.2	Syntetický odpad .....	21
3.6.3	Reaktor .....	21
3.6.4	Příprava a průběh experimentu .....	22
4	Výsledky a diskuze.....	23
5	Závěr.....	31
6	Seznam použitých zdrojů .....	32
7	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	35
8	Přílohy .....	36

# 1 ÚVOD

Používané materiály se při vývoji lidstva měnily především podle dostupnosti. Naše historie je podle těchto období rozdělená na dobu kamennou, bronzovou a železnou. Podobně bychom mohli nazvat dobu od dvacátého století dobou plastovou. Už před touto dobou byly po staletí využívány některé přírodní polymery (přírodní kaučuk), lidstvo si však neuvědomovalo výskyt makromolekul a neumělo tyto materiály plně využívat. V období dvacátého století došlo k rychlému vývoji polymerů, především díky jejich výborným vlastnostem, např. nízké hustotě, nízké zpracovatelské teplotě, vynikající elektroizolační vlastnosti, ale i možnosti učinit je vodivými, širšímu rozsahu pevnosti, pružnosti a tvrdosti. Souběžně se rozvíjely i modifikace polymerů, jejich směsi a kompozity [1, 2].

Polymerní materiály se staly velmi populárními, a proto se začaly využívat v různých odvětvích: automobilový průmysl, stavební průmysl, elektronika, obalové materiály a další. Evropská spotřeba plastů byla v roce 2011 přibližně 47 mil. tun. Spotřeba plastů se stále zvyšuje, odborníci odhadují, že v nejbližších letech se spotřeba plastů snižovat nebude. Pokud by se předpoklady naplňovaly, v budoucích letech by byl velký problém s plastovým odpadem. Z tohoto důvodu je nutné vyrábět plasty, které budou biodegradovatelné. Další problém spojený s produkcí plastů je využívání neobnovitelných zdrojů. Většina polymerních materiálů je vyráběna z ropy, proto je dobré začít hledat jiná alternativní řešení [3].

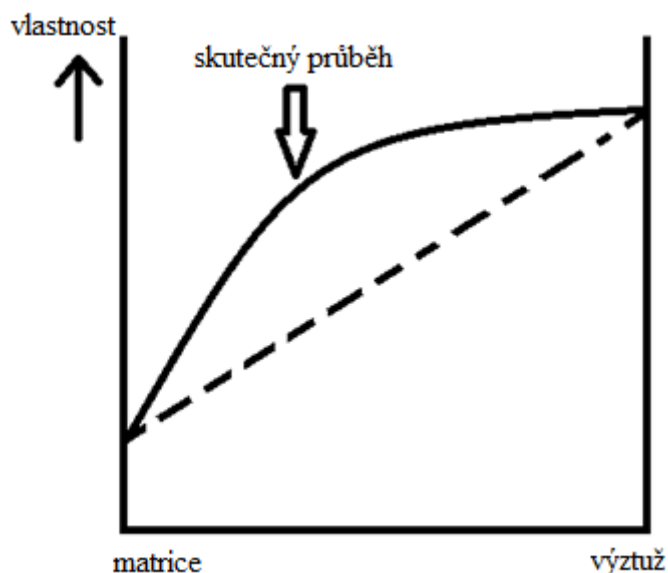
V současné době se dostávají do popředí tedy komerční biodegradovatelné kompozity, které jsou většinou na bázi škrobu, polylaktidů (resp. kyseliny polymléčné), polyhydroxyalkanoátů (PHB, PHBV apod.), celulózy a ligninu. Na trhu jsou zatím kompozity, které jsou biodegradovatelné pouze částečně, buď je biodegradovatelná výztuž, nebo matrice. Tyto kompozity se využívají v mnoha odvětvích. V automobilovém průmyslu je oblíbená kombinace přírodních vláken (sisalová, jutová, kokosová, lněná) a matic získávaných z ropy (polypropylen, epoxidové pryskyřice), které mají uplatnění jako výplně dveří, palubní desky, odkládací přihrádky, vnitřní kryt motoru apod. Najdeme je i v konstrukčním odvětví, vyrábí se z nich i produkty pro běžné užívání – židle, lodě, rybářské pruty, housle. Plně biodegradovatelné kompozitní materiály ještě své uplatnění nenašly, jsou předurčené k použití v interiéru, kde není vlhkost, jako vyplňovací či dekorativní součást, nikoliv jako konstrukční materiály [4].



## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Kompozitní materiály

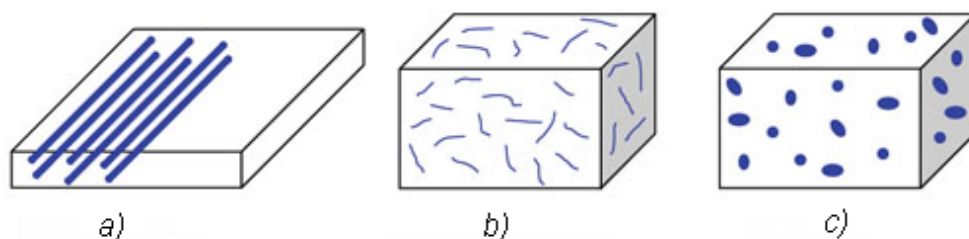
Kompozitní materiály jsou heterogenní materiály složené ze dvou nebo více fází. Fáze se výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Kompozit však dosahuje unikátních vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoliv složkou (fází) samostatně ani prostou sumací. Tento jev se nazývá synergismus, který vede k získávání materiálů s novými vlastnostmi. Kompozitní materiál má dvě základní složky, důležitým faktorem je kvalita rozhraní. Čím větší adheze je mezi fázemi, tím lepší výsledné vlastnosti má kompozitní materiál. Spojitá složka se nazývá matrice, obvykle je poddajnější a má funkci pojiva. Nevýztužená matrice má nízkou hustotu a je snadno zpracovatelná. Matrice je odolná proti působení širokého spektra prostředí a chemikálií. Velkou nevýhodou matric je jejich nízký modul pružnosti, nízká pevnost a křehkost, z toho důvodu nemohou být použity v konstrukčních aplikacích samostatně. Druhou nespojitou (diskontinuální) složkou je výztuž, která je tvrdší, tužší a pevnější, ale náchylná k poškození v některých agresivních prostředích. Výztuž má obvykle výrazně lepší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd.) a nese převážnou část aplikovaného vnějšího napětí [1, 5].



Obrázek 1: Synergické chování složek kompozitu [5]

Existují různé typy kompozitních materiálů: kov-kov, keramika-kov, keramika-polymer, keramika-keramika a polymer-polymer. Kompozitní materiály mají mnoho výhod: nízká měrná hmotnost (hustota), vysoký specifický modul pružnosti, vysoká specifická pevnost, vysoká odolnost vůči dynamickému namáhání, vysoká tvarová komplexnost, možnost „šití“ materiálu na míru, dobré tepelné a elektrické izolační vlastnosti, minimální ztráty elektromagnetického záření. Mají i své nevýhody: vysoká cena, nízká odolnost vůči vyšším teplotám, kritické oblasti v místech spojů, zhoršená detekce skrytých vad, horší možnosti oprav, omezené způsoby recyklace.

Kompozitní materiály můžeme rozdělit podle geometrického tvaru výztuže na částicové a vláknové. Vláknové kompozity můžeme dále dělit na kompozity s dlouhými a krátkými vlákny.



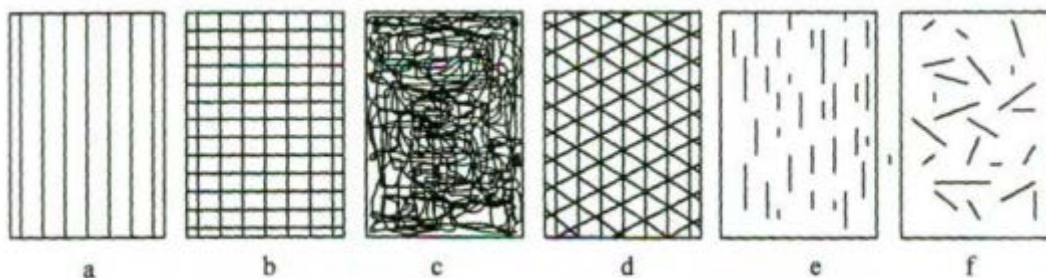
Obrázek 2: Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru výztuže: a) s dlouhými vlákny, b) s krátkými vlákny, c) částicový [5]

### 2.1.1 Částicové výztuže

Vyztužující částice mají různé tvary, které mohou být nepravidelné, ale mohou mít i kulovitý, destičkovitý nebo tyčinkovitý tvar. U částicových kompozitů nepřesahuje jeden rozměr útvaru výztuže výrazně ostatní rozměry. Velikost částic se pohybuje mezi 1 – 20  $\mu\text{m}$ . Částicová plniva jsou většinou anorganická. Nejpoužívanějším plnivem je vápenec, dále se používá například kaolín, mastek nebo slída, ze syntetických plniv je nejrozšířenější silika. Částicová plniva se začala nejdříve používat kvůli snížení ceny, později se zjistilo, že plnivo zlepšuje mechanické vlastnosti (tuhost, tvrdost, odolnost vůči poškrábání, tepelnou vodivost, optické vlastnosti, chemickou odolnost, povětrnostní stabilitu, rozměrovou stabilitu, krystalinitu, elektroizolační vlastnosti a snižuje hořlavost). Na rozdíl od vláknových kompozitů, kde je úkolem matrice chránit výztuž a umožnit přenos vnějších napětí do matrice, je matrice částicových kompozitů nositelem všech podstatných mechanicko-fyzikálních a chemických vlastností. Nositelem tuhosti je jak plnivo, tak i polymerní matrice. Při výrobě je důležitá dispergace plniva, nesmí vznikat velké aglomeráty, které mají nízkou pevnost, snižují soudržnost materiálu a při zatížení vytvářejí křehký lom [6].

### 2.1.2 Vláknové výztuže

U vláknových kompozitů jsou útvary výztuže v jednom směru výrazně rozměrnější než ve směrech ostatních. Vláknové kompozity dále dělíme podle délky vyztužujících vláken na kompozity s krátkými vlákny, u nichž je délka vláken výrazně menší v porovnání s velikostí daného výrobku a na kompozity s dlouhými (kontinuálními) vlákny, u nichž je délka srovnatelná s velikostí výrobku. Důležitý parametr, který přesně rozlišuje krátká a dlouhá vlákna, se nazývá aspektní (štíhlostní) poměr. Aspektní poměr je poměr délky vlákna k jeho průměru, pokud je hodnota poměru menší než 100, hovoříme o krátkých vláknech, naopak pokud je tato hodnota větší než 100, jedná se o dlouhá vlákna. Uspořádání kontinuálních vláken v kompozitech má řadu variant, které lze vidět na obrázku 3. Pro dlouhoválné kompozitní materiály je charakteristické, že jejich pevnost v tahu ve směru osy vyztužujících vláken je výrazně vyšší, než je pevnost stejného materiálu v kompaktní formě (deska, tyč atd.). Pevnosti kompozitů, které jsou vyztužené vlákny, výrazně převyšují pevnosti konvenčních materiálů. Pevnost vláken se zvyšuje s jejich klesajícím průměrem, protože klesá velikost a pravděpodobnost výskytu defektů ve vláknech. Orientace defektů ve směru osy vláken má výrazně méně škodlivý vliv než defekty orientované kolmo k ose vláken. Orientace pevných vazeb ve směru osy vláken také zvyšuje pevnost. Vyztužení vlákny je využíváno zejména ke zvýšení pevnosti, modulu pružnosti, tuhosti a někdy rovněž houževnatosti [5].



Obrázek 3: Příklady uspořádání vláknové výztuže v kompozitech: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací [7]

### 2.1.2.1 Krátkovláknové výztuže

Výhodou krátkovláknových výztuží je možnost izotropie, pokud je kompozit vyztužený krátkými vlákny s náhodnou orientací, poté jsou vlastnosti nezávislé na směru. Přenos napětí neprobíhá stejně jako u kompozitů vyztužených dlouhými vlákny, kdy se téměř veškeré napětí přenesou na vlákna, musíme brát v úvahu přenos napětí konci vláken a povrchem vláken. Zatížení působící na kompozit je u krátkovláknových kompozitů rozděleno mezi vlákna a matici, zčásti je také přenášeno na rozhraní vlákno-matrice, kde dochází k omezení přetváření matrice. Matrice musí snášet větší zatížení, což způsobuje, že krátkovláknové kompozity jsou méně odolné vůči únavě oproti dlouhovláknovým kompozitům [6].

## 2.2 Anorganická vlákna

Anorganická vlákna jsou důležitá kvůli jejich tepelnému odporu a jejich slučitelnosti s kovovou nebo keramickou maticí. Největší komerční zájem je především o vlákna, která jsou založená na oxidu křemičitém, oxidu hlinitém, bóru, karbidu křemíku a o vlákna z kovu, která mají vysoký bod tání (ocel nebo slitiny z molybdenu, niklu, titanu, wolframu). Z mnoha typů jsou níže uvedeny pouze dva nejznámější [8].

### 2.2.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou tenká vlákna, která mají pravidelný kruhový průřez. Vlákna se vyrábí tažením z roztavené skloviny. Skleněná vlákna jsou na základě své amorfní struktury izotropní. Materiálové vlastnosti jsou tudíž v podélném i příčném směru totožné. Mají relativně vysoké hodnoty pevnosti a modulu pružnosti v tahu. Nejběžnější typ skleněných vláken je vyráběn z E-skloviny, další známé typy skla jsou S/R-sklovina a C-sklovina. Základem E-skloviny je několik různých oxidů  $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ , ani jeden z oxidů neobsahuje alkalické prvky. Vlákna jsou vynikajícím elektrickým izolantem s vysokou propustností pro záření [1, 9].

### 2.2.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna dosahují extrémně vysokých pevností, vysokého modulu pružnosti a tepelné odolnosti s nízkou měrnou hmotností. Uhlíková vlákna jsou krystalická, obsahují pouze atomy uhlíku, které jsou orientovány přednostně ve směru podélné osy vlákna. Vlákna jsou anizotropní. Uhlíková vlákna mají vysokou korozní odolnost, neodolávají pouze silně oxidačnímu prostředí. Vlákna jsou velmi křehká za normálních podmínek, tudíž se snadno lámou, proto se musí upravovat například směsí na bázi epoxidové pryskyřice [9].

## 2.3 Přírodní vlákna

Příroda nabízí spoustu materiálů, které mohou být využity jako vláknová výztuž. Z přírodních materiálů jsou využívány rostlinné výztuže, jejichž základem je celulóza. Vlákna se nacházejí ve všech částech rostlin, v listech, plodech, krytech semen a stonku. Přírodní vlákna mohou být považována za biologicky odbouratelná a získaná ze zcela obnovitelných zdrojů. Přírodní vlákna mají zpravidla velmi dobrý modul pružnosti a dobrou pevnost v tahu. Jejich velkou výhodou je jejich nízká hustota, proto jsou vhodnou surovinou pro lehké konstrukce. Naopak jejich velký problém je způsoben závislostí vlastností na podmínkách růstu a tedy velký rozsah hodnot při mechanických zkouškách. Dále jsou vlákna citlivá na působení vlhkosti. Při zpracování také musíme dbát na teplotu, protože při teplotách nad 200 °C vlákna degradují, kvůli tomu je i omezený výběr matric. Mezi nejvyužívanější organická přírodní vlákna patří len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna [9, 10].

### 2.3.1 Lněná vlákna

Lněná vlákna se získávají ze stonku lnu setého (*Linum usitatissimum*). Vlákna jsou tradičně využívána v textilním průmyslu, v poslední době se využívají v podlahových krytinách a automobilovém průmyslu. Len je zdrojem mnoha cenných surovin, nejvýznamnější je lněné semeno. Sekundární materiál je právě lněné vlákno, které se získává z lodyhy. Lodyha má celkem pět vrstev, z druhé vrstvy pod kůrou, kterou nazýváme lýko, se získávají vlákna. Lněné vlákno neobsahuje pouze celulózu (80 %), ale také hemicelulózu, lignin, tuk, vosky a pektiny.

Lněná vlákna se dají získat mnoha způsoby - máčení ve vodě, rosení, chemické a fyzikální metody. Nejčastěji se používá rosení a máčení. Rosení je na rozdíl od máčení ve vodě proces aerobní. Po vytrhání lnu se rostlina rosí a máčí, při tomto procesu na dřevinu působí mikroorganismy, které rozruší rostlinné vazby mezi vlákny a dřevinou. Organismy rozkládají rostlinné „lepidlo“ (pektin), když už je rosení v pokročilém stádiu, je potřeba rostliny otočit. Otáčení napomáhá rovnoměrnému rosení a zabraňuje nežádoucímu růstu vegetace. Doba rosení je rozhodující pro kvalitu vlákna. Pokud proces rosení zastavíme brzy, tak vlákno bude hrubé, tuhé a slabé [10].

### 2.3.2 Jutová vlákna

Juta (*Corchorus capsularis* a *Corchorus olitorous*) je jedním z nejznámějších vláken využívaných v textilním průmyslu rostlinného původu. Nejvíce se pěstuje v Indii, kde se používá i jako zelenina. Juta potřebuje vlhké klima s teplotami okolo 34 °C, vlhkost by se měla pohybovat mezi 70 % a 90 %. Minimální množství srážek pro pěstování juty je 1000 mm za rok. Jutová vlákna jsou dlouhá, měkká a lesklá. Jsou to jedny z nejlevnějších přírodních vláken. Skládají se převážně z celulózy, ligninu a pektinu. Jsou dva hlavní typy juty. První typ je *capsularis* a druhý *olitorous* (*tossa*), *capsularis* je bílá, naopak *olitorous* je žlutavá až načervenalá. *Olitorous* je jemnější a silnější [10].

### 2.3.3 Konopná vlákna

Konopná vlákna se vyrábí ze stonků konopí setého (*Cannabis sativa*). Rostlina roste v oblastech s mírným podnebím. Konopí můžeme rozdělit na tři skupiny: severní konopí, evropské konopí a jižní konopí. Severní konopí se vyznačuje krátkou dobou růstu

(60 - 75 dní), má vysoký výnos semen, ale málo kvalitní vlákna. Naopak jižní konopí má vysokou kvalitu vláken, málo semen a roste podstatně déle (přes 150 dní). Evropské konopí má výnosy semen a kvalitu vláken mezi předchozími dvěma druhy. Konopná vlákna mají všeobecně dobré technické vlastnosti, mají vysokou pevnost v tahu a také dobrou odolnost vůči chladu i teplu [10].

## **2.4 Způsoby kompatibilizace přírodních vláken**

Důležitou vlastností pro kompozitní materiály je pevnost jejich rozhraní. Rozhraní není jasně definovaná hranice, ale oblast, která se může rozšířit přes značnou vzdálenost od vláken, často popisováno jako mezifáze. Přírodní vlákna mají hydrofilní charakter, technické polymerní matrice mají hydrofobní charakter, a proto je potřeba upravit přírodní vlákna tak, aby adheze mezi matricí a vlákny byla lepší, tím se zlepší i výsledné vlastnosti kompozitního materiálu. K modifikaci vláken se používají fyzikální a chemické modifikace [11].

### **2.4.1 Fyzikální úpravy**

Fyzikální modifikační metody upravují povrch vlákna, ale nemění se přitom chemické složení daných látek. Používají se povrchové úpravy působením výbojů (nizkoteplotní plazma, koronový výboj), dále sem patří napínání, leptání, vyhlazování a úprava teplem. Leptání zlepšuje drsnost povrchu, což vede ke zvýšení přilnavosti a snižuje odraz světla. Nizkoteplotní plazma může být generována za atmosférického tlaku v přítomnosti hélia. Účinek plazmatu zahrnuje odběr protonů a vytvoření nestabilních radikálů, které přeměňují funkční skupiny, jakými jsou alkoholy, aldehydy, ketony a karboxylové kyseliny. Koronový výboj je důležitá oxidační technika pro aktivaci povrchu, tím se mění povrchová energie celulózových vláken, což ovlivňuje viskozitu taveniny kompozitů [12].

### **2.4.2 Chemické úpravy**

Chemickými úpravami se snažíme zmírnit hydrofilní charakter vláken a tím zlepšit rozhraní přírodních vláken a matrice. Díky chemickému ošetření je na povrchu vlákna více reaktivních skupin, což usnadňuje efektivní spojení vláken s matricí. V důsledku lepšího spojení jsou i lepší mechanické vlastnosti kompozitního materiálu [13].

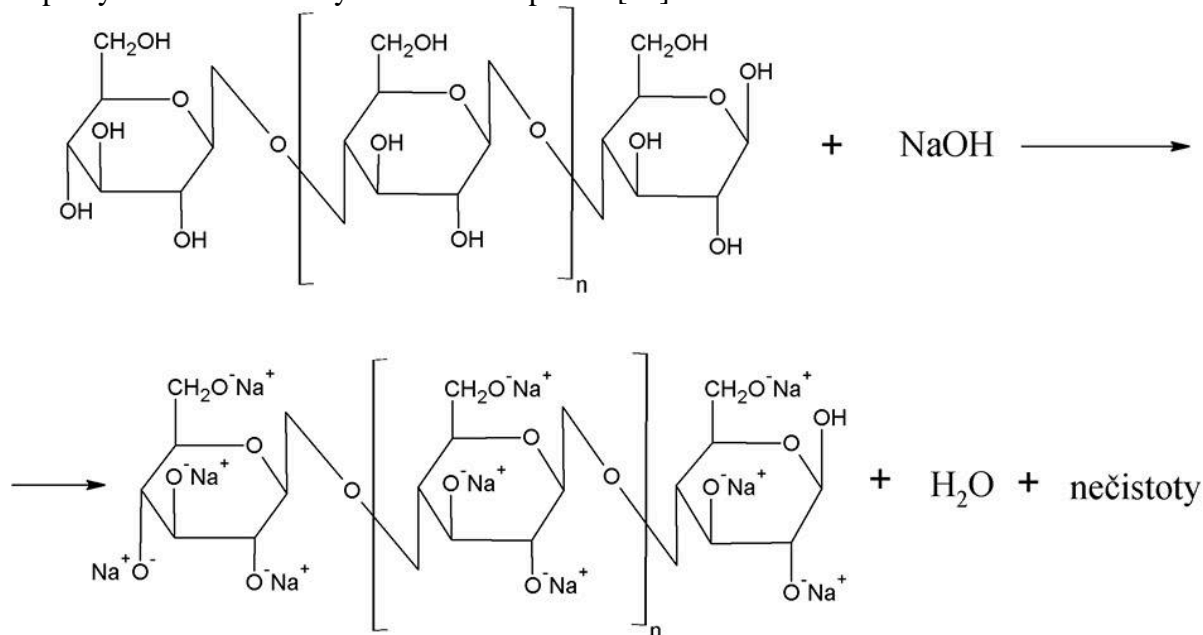
#### **2.4.2.1 Silanizace**

Silanizace probíhá díky derivátům silanu. Nejběžněji používané silany jsou hydroxysilany. Silany jsou bifunkční, používají se jako spojovací činidla. Obecný chemický vzorec derivátu silanu je  $X_3-Si-R$ .  $R$  je skupina, která je schopna reagovat s matricí.  $R$ -skupina může být vinyl,  $\gamma$ -aminopropyl aj.  $R$ -skupina se volí tak, aby zreagovala s příslušnou matricí u termosetů. U termoplastů je vhodné, aby tato skupina byla dlouhá a tvořila zapleteniny.  $X$  jsou skupiny, které mohou hydrolyzovat a poté reagovat s hydroxylovými skupinami na povrchu vlákna. Silany snižují počet hydroxylových skupin celulózy ve vláknech. V přítomnosti vlhkosti se hydrolyzuje alkokyskupina, tento proces vede k tvorbě silanolu a alkoholu. Silanol reaguje následně s hydroxylovou skupinou vlákna prostřednictvím vodíkových vazeb. Volné silanolové skupiny reagují mezi sebou a také tvoří vazby  $-Si-O-Si-$ . Následně se rozpadají vodíkové vazby mezi silanolovou a hydroxylovou skupinou, vzniká pevná kovalentní vazba k upravovanému organickému substrátu  $-Si-O-C-$  a odštěpuje se voda.  $X$ -skupina může být nahrazeno chlorem, methoxy nebo ethoxy skupinou. V silanu tedy silanové molekuly slouží

ke spojení pryskyřice a vlákna prostřednictvím siloxanových můstků, zatímco organofunkční skupiny silanu se vážou na polymerní pryskyřice [14, 15].

#### 2.4.2.2 Alkalická úprava

Alkalická úprava přírodních vláken se provádí pomocí hydroxidu sodného. Tento způsob je široce používán k úpravě vláken s celulóзовou strukturou. Úprava hydroxidem mění strukturu krystalické celulózy na amorfnní oblasti, ve které jsou celulóзовé mikrostruktury vzdáleny daleko od sebe, mezery jsou vyplněny molekulami vody. Dále hydroxylová skupina reaguje s molekulami vody a začíná vznikat vazba vlákno-O-Na. Následně se vlákno promývá ve vodě, sodíkové kationty ze struktury odchází a vznikají hydroxylové skupiny. Vlákno je znovu uspořádáno do krystalické struktury s jinou modifikací, která je pevnější v podélném směru. Hydroxid také odstraní určitou část látek, které jsou ve struktuře nežádoucí – lignin, pektin, vosk a olej. Vlákno se stává jednotnější a přenos napětí na vlákno v kompozitním materiálu je lepší. Zároveň se snižuje průměr vlákna a tím se zvyšuje efektivní povrch vláken pro dobrou přilnavost s matricí. Pokud by se použilo příliš velké množství hydroxidu, mohlo by dojít k zeslabení a poškození vlákna, to by se samozřejmě projevilo i na mechanických a tepelných vlastnostech výsledného kompozitu [13].



Obrázek 4: Schéma průběhu alkalické úpravy přírodních vláken

## 2.5 Matrice

Matrice je spojitá (kontinuální) fáze kompozitního materiálu. Jejím úkolem je chránit vyztužující komponentu před vlivy okolí, udržovat vnější geometrický tvar a zároveň udržovat komponentu v požadovaném směru. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno bylo dobře prosyceno a bylo bez bublin. Matrice se nejčastěji rozdělují na polymerní, kovové a keramické. Dále se práce zabývá pouze polymerními matricemi, které se dělí na termosety (reaktoplasty) a termoplasty [9].

### 2.5.1 Termosety (Reaktoplasty)

Termosetické matrice jsou při normální teplotě v tekutém stavu, nebo jsou lehce tavitelné, díky tomu je snazší jejich zpracování. Zpracovatelské teploty jsou tedy nižší než u termoplastických pryskyřic. Také lépe smáčejí a prosycují vlákna. Po vytvrzení pryskyřice ztrácejí svoje plastické vlastnosti a stávají se nerozpustnými a netavitelnými. Vytvrzení probíhá za přídavku iniciátoru, katalyzátoru a urychlovače, také dodáním energie potřebné k iniciaci vytvrzovací reakce (teplo, záření). Termosetické matrice jsou po vytvrzení trojrozměrně zesíťované materiály, nikoliv dlouhé lineární molekuly. Dosahují vysokých hodnot pevností a tuhostí, ale jsou křehké a tažnost se pohybuje v řádu procent. Houževnatost materiálu se zvyšuje přídavkem modifikačních přísad. Mezi nejčastější typy těchto pryskyřic patří především nenasyčené polyesterové pryskyřice, vinylesterové nebo fenakrylátové pryskyřice, epoxidové pryskyřice, fenolické pryskyřice, metakrylátové pryskyřice a izokyanátové pryskyřice. Termosetické pryskyřice převažují v kombinaci s vláknovou výztuží [1, 9, 17].

### 2.5.2 Termoplasty

Termoplastické matrice jsou za normálních teplot v pevném stavu, teprve po zahřátí na vyšší teplotu jsou tekuté. Změna pevného stavu na tekutý a zpátky je vratná, může se vícekrát opakovat. Termoplasty jsou velmi dlouhé molekuly vytvořené opakováním stejných strukturních jednotek, jsou tedy makromolekuly. Makromolekuly k sobě nejsou vázány chemickými vazbami. Interakce, které zaručují soudržnost celého materiálu, jsou slabé, např. van der Waalsovské interakce, vodíkové můstky. Nejpoužívanější termoplastické semikrystalické matrice jsou PP, PE, PA a z amorfních pryskyřic se využívá PS, PMMA [1, 17].

Termoplasty jsou ve většině případů využívány v kombinaci s částicovým plnivem, používá se však také vyztužení krátkými vlákny, to slouží především k zesílení matrice při vstřikování, i vyztužení dlouhými vlákny, tyto materiály se většinou dávkuje z plastifikačního extruderu přímo do lisovací formy. Termoplasty vyztužené skleněnou rohoží, tkaninou či jednosměrnými pásy se používají jako polotovary pro další zpracování [9]. V této práci je věnována pozornost zvláštní skupině plastů, které mají schopnost být biologicky odbouratelné. Jedná se o tzv. biodegradabilní plasty.

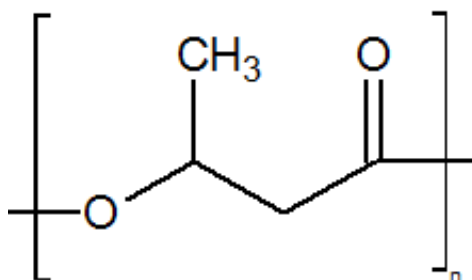
#### 2.5.2.1 PHB

Polyhydroxybutyrát se řadí mezi polyhydroxyalkanoáty. PHA jsou alifatické polyestery, které mohou být získávány fermentací cukrů a lipidů (glukóza, sacharóza, rostlinné oleje) širokým množstvím bakterií. V procesu výroby rostou bakterie na vhodném médiu a jsou zásobované dostatečným množstvím výživových látek. Až bakterie dosáhnou požadovaného složení výživových látek, začne se produkovat PHA. Biosyntéza PHA se zvyšuje při nedostatku některých prvků (fosfor, dusík, stopové prvky, kyslík) a při přebytku uhlíku. Polyestery jsou uloženy v buňce ve formě granulí. PHA jsou termoplastické, UV stabilní, odolávají teplotám do 180 °C a jsou těžko propustné pro vodu, svými vlastnostmi podobné PP [18].

Polyhydroxybutyrát je lineární termoplastický polyester vyráběný řízeným bakteriálním fermentačním procesem. PHB bylo objeveno francouzským mikrobiologem Maurice Lemoignerem v roce 1923. Polyhydroxybutyrát je biodegradabilní polymer, vysoce



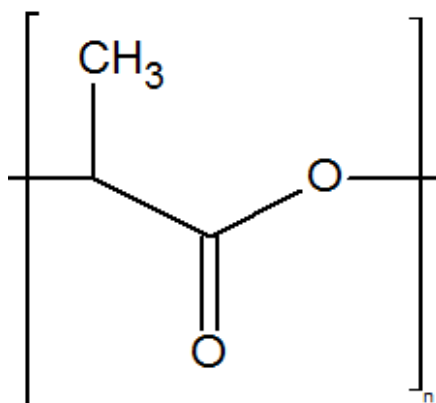
krystalický, zároveň je pevný a má dobrý modul pružnosti – srovnatelný s isotaktickým polypropylenem. P3HB může být degradován na vodu a oxid uhličitý. Má polární povahu, tudíž vykazuje lepší adhezi k přírodním vláknům ve srovnání s polyolefiny. Bohužel je PHB křehký, hlavní nevýhodou je tepelná nestabilita. Zpracování samotného PHB je obtížné, protože poblíž svého bodu tání se rozkládá. Pokud je do jeho struktury zabudován jiný monomer, tak tento vzniklý kopolymer už je lépe zpracovatelný a zároveň má výrazně lepší mechanické vlastnosti [19].



Obrázek 5: Strukturní vzorec PHB

#### 2.5.2.2 PLA

Kyselina polymléčná se získává například z kukuřice nebo cukrové třtiny. Získávat ji můžeme i z ropy nebo fermentací výchozího sacharidu (škrob, cukr) bakteriemi. Fermentací získáme kyselinu mléčnou, následně dochází k dehydrataci a otevření kruhu, poté se vytváří kyselina polymléčná. PLA je biodegradovatelná (rozložitelná) v přírodě i v lidském těle. Z PLA se hydratací získá kyselina mléčná, která se v aerobním prostředí rozkládá na CO<sub>2</sub> a vodu. PLA má L a D optický izomer. Byla objevena v roce 1780 švédským chemikem Carlem Wilhelmem. Kyselina polymléčná je amorfni, může být i částečně krystalická. Mechanické vlastnosti jsou blízké polyolefinům. Kyselina polymléčná je hydrofilní, propouští vodní páru. Používá se v lékařství, vyrábí se z ní implantáty a využívá se jako nosič léčiv.



Obrázek 6: Strukturní vzorec kyseliny polymléčné [20]

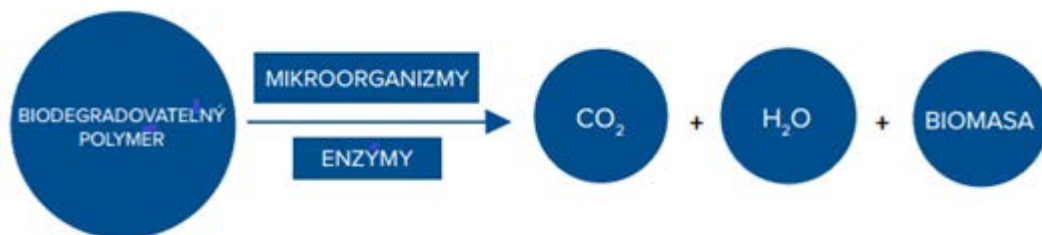
## 2.6 Vlastnosti

Zkušebních metod pro stanovení vlastností kompozitů existuje velké množství. Lze je rozdělit na destruktivní (mechanické zkoušky, testy hořlavosti, testy povětrnostní odolnosti) a nedestruktivní (vizuální kontrola, ultrazvuk, termografie atd.).



### 2.6.1 Biodegradabilita

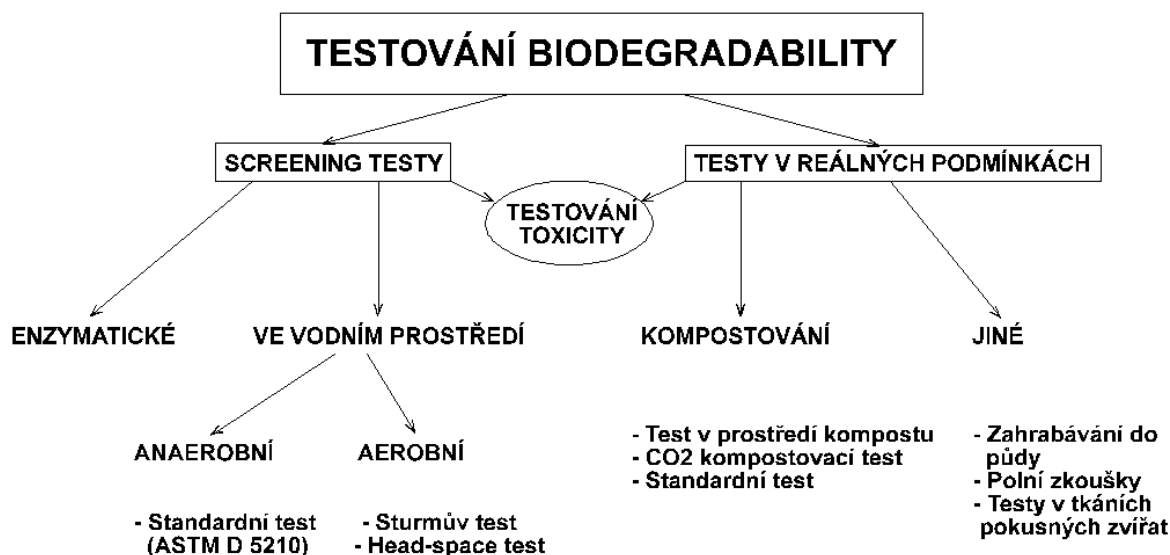
Biologický rozklad je proces degradace materiálu účinkem živých organismů. Proces biodegradace je založený na tom, že organizmy (především mikroorganismy – bakterie, houby, řasy) identifikují polymer jako zdroj stavebních jednotek a zdroj energie, který potřebují ke svému životu. Rozklad polymerů probíhá za přítomnosti enzymů a polymer se v konečném stavu přemění za aerobních podmínek na vodu, oxid uhličitý, biomasu a za anaerobních podmínek na metan, vodu a biomasu. Konečné produkty biodegradace nejsou toxické a běžně se nachází v přírodě. Biodegradace je ovlivněná několika faktory: teplotou, světlem, živinami, hodnotou pH, vlhkostí a přítomností kyslíku [18].



Obrázek 7: Schéma biodegradace [18]

Proces biodegradace nelze jednoznačně popsat z důvodu velkého množství různých struktur polymerů, velkého množství enzymů produkovaných mikroorganismy a rozdílnými reakčními podmínkami. Proces lze rozdělit na abiotické procesy (oxidace, hydrolýza, fotolýza atd.) a následně biotické (enzymatické procesy). Abiotické procesy slouží ke krácení řetězců dlouhých makromolekul. Vzniklé monomery jsou přeměňovány enzymatickými procesy na výsledné produkty. Bakterie i houby mají schopnost přeměňovat plasty. Bakterie jsou důležitějšími degradačními organismy, pro rozklad nejrozličnějších materiálů disponují celými metabolickými dráhami, které se dělí většinou na horní a spodní dráhu. Horní dráha přemění materiál na meziprodukt, který je pak přeměňován ve spodní dráze na konečný produkt. Přeměna materiálu pomocí bakterií probíhá intracelulárně (uvnitř buněk). Naopak u hub probíhá přeměna extracelulárně. Enzymy, které jsou produkované houbami, nejsou tak strukturně specifické, a proto napadají více druhů materiálů [18, 21].

Biodegradabilita může být testována mnoha metodami. Jednou z prvních metod byla schopnost plastu odolávat mikrobiálnímu napadení. Využívanější metody jsou založeny na stanovování koncových produktů mikrobiálního procesu. V této práci se zaměřím na test v prostředí kompostu.



Obrázek 8: Testovací metody biodegradability [22]

### 2.6.2 Nasákavost vodou (ASTM D-570)

Nasákavost, tedy schopnost absorbovat vodu, stanovujeme v procentech. Je to poměr hmotnosti vody pohlcené zkušebním vzorkem k hmotnosti vysušeného vzorku. Obsah vlhkosti vody v plastech úzce souvisí s některými vlastnostmi – elektrický izolační odpor, mechanické pevnosti, vzhled a změna rozměrů. Při tomto testu jsou zkušební vzorky ponořeny do vody na 24 hodin a je měřena změna hmotnosti těles [1, 23].

### 2.6.3 Hydrolytická stabilita

Přírodní vlákna mají hydrofilní charakter, proto snadno absorbují vlhkost. Pokud kompozit absorbuje vodu, tak následně degraduje. Čím déle jsou kompozity vystaveny vlhkému prostředí, tím více ztrácí mechanické vlastnosti (modul pružnosti v tahu, pevnost). Ztráta je přímo úměrná nasákavosti vody. U lněných vláken se zvyšuje absorpce vody se zvyšujícím se obsahem lněných vláken. Transport vody do kompozitního materiálu je usnadněný pokud jsou v matici trhliny, póry nebo kapilárním jevem podél rozhraní vlákno/matrice. Hydrolytickou stabilitu můžeme zvýšit úpravou povrchu vláken jak chemickou, tak fyzikální, která sníží jejich afinitu k vodě [24].

### 2.6.4 Tahová zkouška (ASTM D-638, ISO 527)

Tato mechanická zkouška slouží ke stanovení tahových vlastností plastů a plastových kompozitů. Vyhodnocením zkoušky získáme tahové charakteristiky ze závislosti napětí v tahu - mez pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu. Při této zkoušce je na konce vzorku kompozitního materiálu aplikována tahová deformace až do přetržení. Vzorek částicového nebo krátkovlákného kompozitního materiálu má nejčastěji tvar „dog-bone“. Konce vzorků se rozšiřují kvůli deformaci na správném místě, pokud by konce vzorků nebyly rozšířené, deformace by mohla nastat hned za přichycením [25].

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 Použité materiály

Vytvořený biokompozit se skládá z lněných neupravených vláken a PHB. Na úpravu vláken byly použity některé chemikálie – NaOH, etanol, koncentrovaná kyselina octová, silany, voda.

##### 3.1.1 PHB

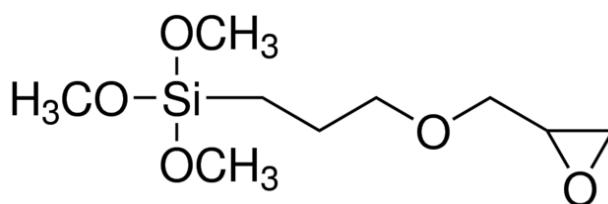
Použitý polyhydroxybutyrát má oficiální název ETNAM PHBV pryskyřice, kód tohoto produktu je Y1000P. Výrobce udává rozklad materiálu nad 180 °C. Tato pryskyřice je speciálně navržena pro vstřikování [26].

##### 3.1.2 Vlákná

V této bakalářské práci byla použita lněná krátká vlákna střižená na délku 2 mm. Vlákná byla dodána polskou firmou EKOTEX, která tyto vlákna doporučuje pro vyztužení polymerních kompozitů. Kompozity by se měly vyrábět vstřikováním. Vlákná nejsou nijak upravená, pouze vysušená.

##### 3.1.3 $\gamma$ -Glycidoxypropyltrimethoxysilan

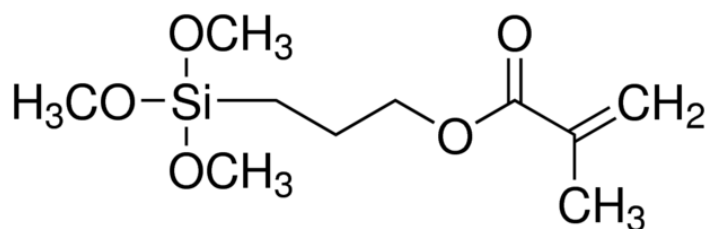
Použitý silan byl vyrobený firmou XIAMETER® pod oficiálním označení OFS-6040. Silan je dvojfunkční. Obsahuje glycidoxy reaktivní organickou skupinu a trimethoxysilyl anorganickou skupinu. Glycidoxy funkční skupina je reaktivní s mnoha různými typy organických polymerů. Silan je vhodné používat při zpracování skleněných vláken, které se používají k vyztužení plastů. Silan zlepšuje fyzikální vlastnosti, zvláště pevnost za mokra. Organická funkční skupina má podobnou reaktivitu jako epoxy skupina, musí tedy dojít k otevření kruhu za kyselé nebo bazické katalýzy a následně dojde k reakci s kyselinami, aminy, alkoholy, thioly. Anorganická skupina podléhá hydrolýze ve vodě [27].



Obrázek 9: Strukturní vzorec  $\gamma$ -Glycidyloxypropyltrimethoxysilanu [28]

##### 3.1.4 $\gamma$ -Methakryloxypropyltrimethoxysilan

Silan byl od firmy SIMGA-ALDRICH. Je to 98% roztok, 1 % tvoří metanol, který se tvoří při hydrolýze. Silan je dvojfunkční, obsahuje methakrylovou reaktivní organickou skupinu a trimethoxysilyl anorganickou skupinu [29].



Obrázek 10: Strukturní vzorec  $\gamma$ -Methakryloxypropyltrimethoxysilanu [29]

## 3.2 Úprava vláken

V této práci byla použita přírodní lněná vlákna od firmy EKOTEX střižená na délku 2 mm bez úprav, pouze vysušená. Na těchto vláknech byly provedeny dvě různé úpravy. První použitá je mercerizace a následně byla použita silanizace.

### 3.2.1 Mercerizace

Vlákna byla upravována v 3% roztoku NaOH. Roztok hydroxidu sodného byl přiveden k mírnému varu, poté byla do roztoku přidána neupravená vlákna. Roztok s neupravenými vlákny byl udržován při mírném varu za občasného míchání dvě hodiny. Poté byl roztok zfiltrován na Büchnerově nálevce za sníženého tlaku a několikrát promyt destilovanou vodou. Takto upravená vlákna byla vysušena v sušárně při 80 °C po dobu 12 hodin.

### 3.2.2 Silanizace

Silanizace byla prováděna dvěma silany:  $\gamma$ -glycidoxypopyltrimethoxysilan a  $\gamma$ -methakryloxypropyltrimethoxysilan. Nejdříve byl připraven 3% roztok silanu, který byl složen z konkrétního silanu, etanolu a vody. Voda a etanol jsou v roztoku obsaženy v poměru 1 : 4. Následně bylo upraveno pH roztoku koncentrovanou kyselinou octovou na hodnotu přibližně 4. Roztok byl hydrolyzován dvě hodiny za stálého míchání. Po uplynutí této doby byla do roztoku přidána vlákna upravená mercerizací. Roztok byl s vlákny dvě hodiny míchán, zahříván a udržován při varu. Poté byla vlákna zfiltrována a promyta v roztoku vody a etanolu ve stejném poměru v jakém byl připravován roztok k hydrolýze. Upravená vlákna byla vysušena při 80 °C po dobu 12 hodin.



Obrázek 11: Aparatura pro hydrolýzu (nalevo) a silanizaci (napravo)

### 3.3 Výroba kompozitu

Kompozity byly vyrobeny pomocí hnětáku PLASTI-CORDER BRABENDER, typ 810601. Jako matrice bylo využito komerčního granulátu pro injekční vstřikování Y1000P od společnosti Enmat (Čína). Celková navážka byla 25 g, byly zhotoveny kompozity s různými objemovými zlomky vláknenné výztuže. Hnětení bylo prováděno při 200 °C. Bylo připraveno celkem 6 kompozitních materiálů, přehled je uveden v tabulce 1. Při výrobě byl zachován jeden postup. Nejdříve bylo zahněteno čisté PHB z granulátu Y1000P, hnětení trvalo 3 minuty. Poté byla minutu dávkována vlákna do roztaveného PHB a další 3 minuty byla tato směs hnětena. Vytvořený kompozitní materiál byl následně vylisován na deskovém lisu LAB-ECON při teplotě 200 °C a tlaku 250 kN. Z každého materiálu byly vylisovány dvě fólie. Jedna fólie měla šířku přibližně 0,6 – 0,8 mm, z které byly vysekaný tělesa ve tvaru dog-bone typu 5B (viz příloha). Druhá deska byla tenčí, cca 0,2 – 0,4 mm, byla použita k testování biodegradace.

*Tabulka 1: Přehled vyrobených kompozitů s matricí PHB*

Označení vzorku	Vlákna	Obj. % vláken
20%_F_ref	Neupravená	20
30%_F_ref	Neupravená	30
25%_F_NaOH	Upravená v roztoku NaOH	25
30%_F_NaOH	Upravená v roztoku NaOH	30
30%_F_silan1	Upravená v roztoku $\gamma$ -methacryloxypropyltrimethoxysilanu	30
30%_F_silan2	Upravená v roztoku $\gamma$ -glycidoxypropyltrimethoxysilanu	30



*Obrázek 12: Vylisované fólie*

### 3.4 Nasákavost vodou

K tomuto testu byly připraveny vysekané dog-bone z vylisované fólie o tloušťce přibližně 0,6 mm. Nejdříve byly suché vzorky zváženy, následně byly vloženy do kádinky s destilovanou vodou a byl vážen rozdíl hmotnosti vzorků. Vzorky byly váženy každý pracovní den po dobu dvou týdnů.



*Obrázek 13: Testování nasákavosti vody*

### 3.5 Pevnost v tahu

#### 3.5.1 Příprava vzorků

Z vylisovaných fólií byla vysekána testovací tělesa tvaru dog-bone typu 5B (viz příloha). Rozměry, tedy šířka a tloušťka, zúžené části připravených vzorků byly změřeny pomocí digitálního posuvného měřidla. U každého kompozitního materiálu bylo testováno nejméně 6 vzorků. Před samotnou tahovou zkouškou byly vzorky obroušeny, aby byly zbaveny povrchových nerovností vzniklých výsekem.

#### 3.5.2 Stanovení pevnosti v tahu

Tahová zkouška vzorku kompozitu byla provedena na univerzálním zkušebním zařízení Zwick Z 010. Rychlost deformace při samotné zkoušce byla 1 mm/min. Upínací vzdálenost byla nastavena na 20 mm. Zkouška probíhala bez extenzometru.

### 3.6 Kompostování

Biodegradace byla prováděna podle normy IS/ISO 20200, která představuje stanovení stupně rozkladu plastů za simulovaných podmínek kompostování v laboratorních podmínkách [24].

#### 3.6.1 Základní princip

Kompostování je aerobní proces. Jsou dvě možné formy inkubace – termofilní a mezofilní. Mezofilní je prováděna při laboratorní teplotě, v bakalářské práci je použita inkubace termofilní, tzn. za vyšší teploty, tedy při 58 °C, aby byl umožněn vývoj pěstování mikroorganismů při vysoké teplotě. Principem této metody je simulovat ideální podmínky kompostování, ke kterému jsou využity přirozeně se vyskytující mikroorganismy polosuché kultivace v kompostu [24].

#### 3.6.2 Syntetický odpad

Složení syntetického odpadu je uvedeno v tabulce 2. Jako inokulum (očkovací látka) je zde použit zahradní kompost, který musí být homogenní a bez velkých objektů jako je sklo, kameny, kusy dřeva apod. Kompost nesmí být starší než 4 měsíce. Všechny složky byly ručně smíchány, následně byla přidána voda tak, aby celková vlhkost byla 55 % [30].

Tabulka 2: Komponenty a jejich procentuální zastoupení v syntetickém odpadu [30]

Materiál	Hmotnost sušiny [%]
Piliny	40
Krmivo pro králíky ve formě granulí	30
Zralý kompost	10
Kukuřičný škrob	10
Sacharóza	5
Kukuřičný olej	4
Močovina	1

#### 3.6.3 Reaktor

Kompostovací reaktor doporučený normou je box o rozměrech 30 × 20 × 10 cm, vyrobený z polypropylenu. Kompostovací reaktor použitý v experimentu je plastový box, který má rozměry: 17,5 × 15 × 6,5 cm (délka, hloubka, výška). Box musí být uzavřený dobře těsnícím



víkem, aby se zabránilo nadměrnému vypařování. V polovině hloubky boxu na širších stranách jsou udělány otvory o rozměrech přibližně  $0,5 \times 6,5$  cm. Tyto otvory poskytují výměnu plynů mezi vnitřním a vnějším prostředím [30].



Obrázek 14: Umístění reaktorů

### 3.6.4 Příprava a průběh experimentu

Testované fólie byly o rozměrech přibližně  $10 \times 15$  cm. Rozměry fólií byly přizpůsobovány podle tloušťky fólie. Testovaný materiál by měl být co největší, rozhoduje tedy velikost reaktoru. Experiment byl zahájen po smíchání syntetického odpadu, kterým byl postupně naplněn každý box do poloviny. Na tuto vrstvu byla položena předem zvážená fólie, na kterou byl znovu navrstven syntetický odpad. Takto připravený box byl rovnoměrně zalit destilovanou vodou tak, aby celková vlhkost byla 55 %. Poté byly boxy zavřeny víkem a byly inkubovány při  $58^\circ\text{C}$ . Podle tabulky 3 byl reaktor vážen, přidávána voda a promícháváno médium. Médium bylo promícháváno velmi opatrně, aby nedošlo k mechanickému poškození studovaného materiálu. V určitých dnech byl testovaný materiál vyndán a vyfocen, aby mohla být posouzena míra biodegradace [30].

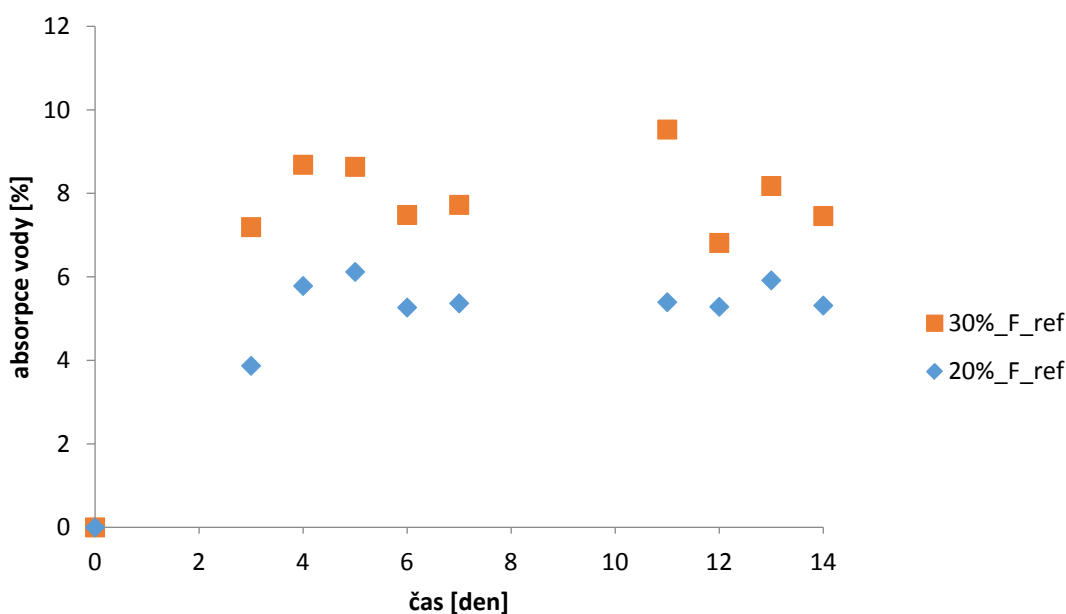
Tabulka 3: Operace v průběhu termofilní inkubace kompostovacího procesu [30]

Čas [dny]	Operace
0	Zaznamenat původní hmotnost reaktoru
1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 14	Vážit reaktor a přidávat vodu na 100 % původní hmotnosti, promíchávat médium
8, 10, 16, 18, 21, 23, 25, 28	Vážit reaktor a přidávat vodu na 100 % původní hmotnosti, nepromíchávat médium
30, 45	Vážit reaktor a přidávat vodu na 80 % původní hmotnosti, promíchávat médium
30- 60 (2krát týdně)	Vážit reaktor a přidávat vodu na 80 % původní hmotnosti, nepromíchávat médium
60- 90 (2krát týdně)	Vážit reaktor a přidávat vodu na 70 % původní hmotnosti, nepromíchávat médium

## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

Při výrobě kompozitů pomocí hnětáku se nepovedl vyrobit vzorek s označením 30%\_F\_NaOH, protože byl v tavenině nehomogenní a netvořil kompaktní hmotu. Vzorky s neupravenými vlákny také nebyly úplně homogenní, ale tvořily soudržnou hmotu, která šla následně vylisovat. Připravené hmoty byly následně vylisovány. Z desek byly vysekány dog-bone typu 5B, které byly testovány na mechanické vlastnosti a hydrolytickou stabilitu.

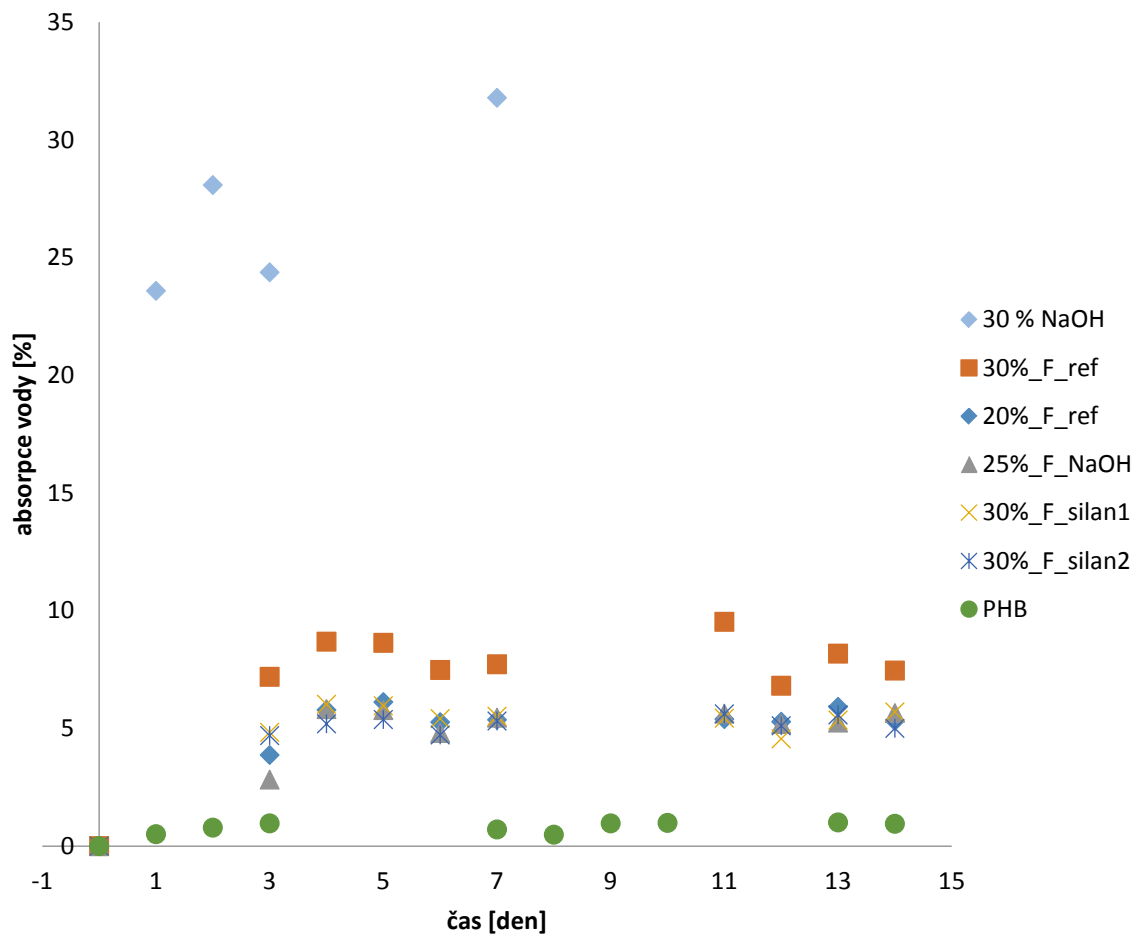
Na obrázku 15 je porovnání absorpce vody kompozitů z PHB s různými objemovými zlomky vláken, na kterých nebyly provedeny žádné úpravy. Z obrázku je patrné, že pokud je v kompozitu více objemových vláken stejného typu, je i absorpce vody vyšší.



Obrázek 15: Nasákavost vodou

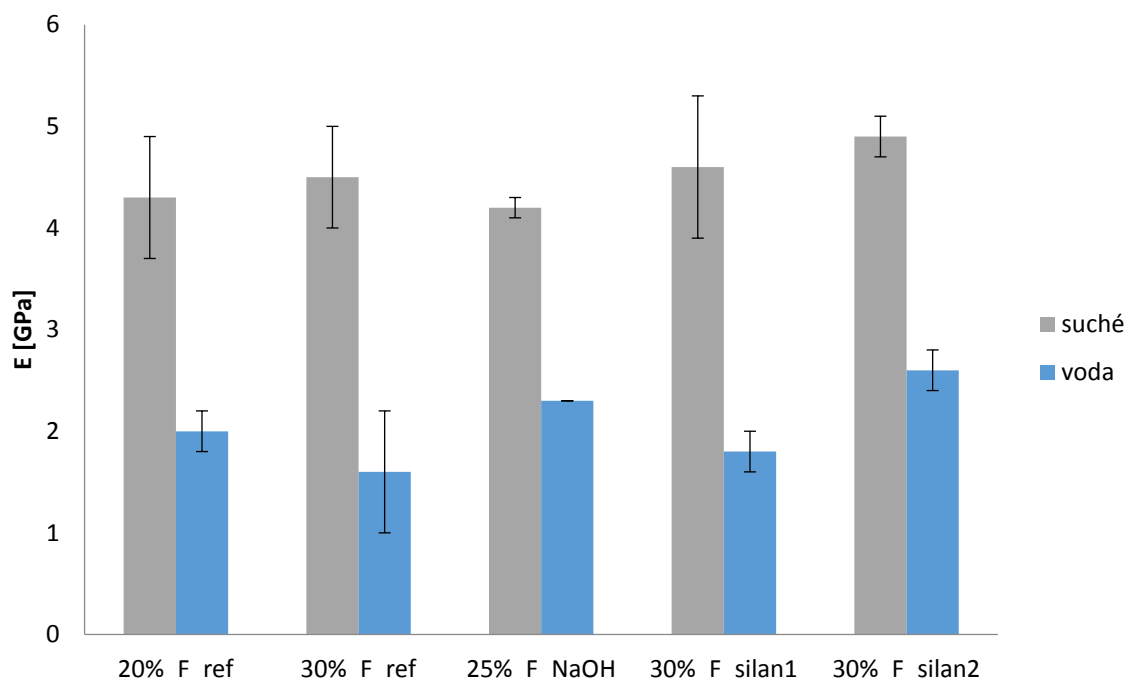
Na obrázku 16 můžeme vidět srovnání kompozitů s 30 obj. % vláken. Kompozit absorbuje vodu prvních pár dní, pak je hodnota vzorku přibližně stejná. Výkyvy v následujících dnech jsou způsobeny nekonstantní dobou sušení jednotlivých vzorků před vážením jejich hmotnosti. Tato nepřesnost se nejvíce projevila u kompozitu tvořeného 30 obj. % neupravených vláken. Ukázalo se, že úprava vláken pomocí roztoku hydroxidu sodného snižuje nasákavost. Nejúčinnější použitou úpravou ke snížení absorpce vody kompozitu je úprava pomocí silanu. V bakalářské práci byly použity dva různé silany, absorpce vody se u obou jevila srovnatelná.





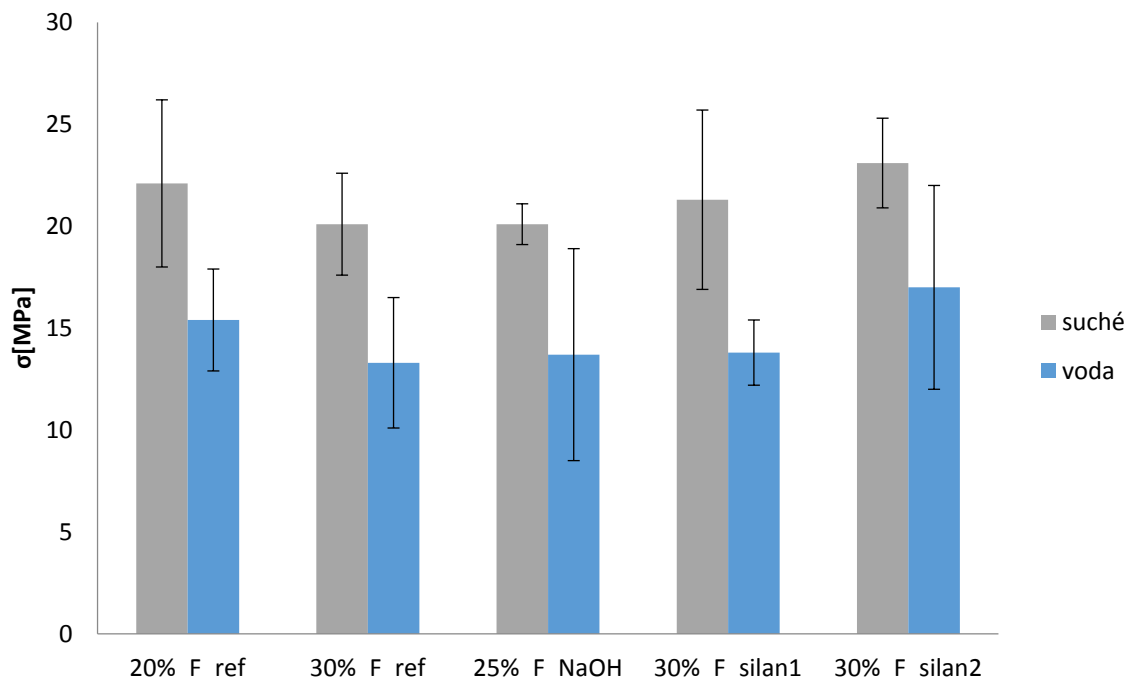
Obrázek 16: Nasákavost vodou kompozitů s 30 obj. % vláken a čistého PHB jako reference

Vzorky z předchozího testu byly osušeny a následně na nich byly testovány mechanické vlastnosti na zařízení Zwick. Testovány byly i referenční suché vzorky. Naměřené hodnoty v rámci série jednotlivých kompozitů byly zprůměrovány. Průměrné hodnoty jsou vyneseny v obrázcích s chybovými úsečkami, ze kterých je patrný i velký rozptyl hodnot. Je to způsobeno jednak přípravou vlastní fólie, která nebyla díky lisování zcela homogenní, vlastním výsekem vzorků a také díky jejich nízkému počtu (6 ks pro každou hodnotu), který byl dán množstvím materiálu, jenž byl v době vypracování práce k dispozici. Z obrázku 17 je patrné, že alespoň dvojnásobně nižší jsou moduly pružností v tahu u vzorků, které byly podrobeny hydrolytické stabilitě. Nejvyšší modul pružnosti v tahu má kompozit s výztuží vláken upravených v silanu2. Rozdíly mezi jednotlivými vzorky však nejsou nijak velké.



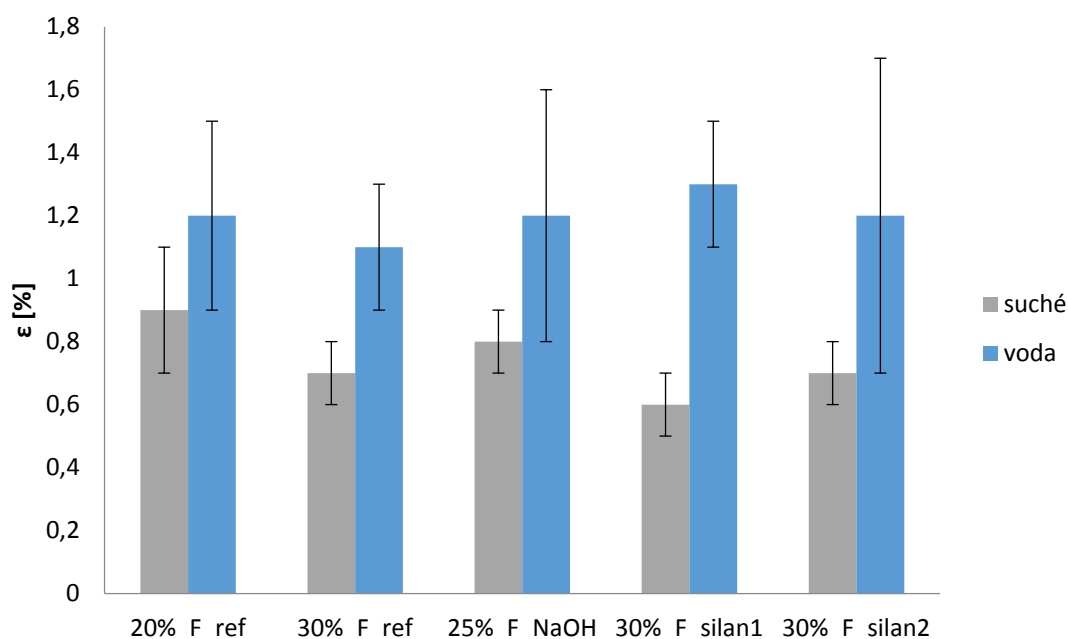
Obrázek 17: Srovnání modulů pružnosti v tahu

Podobně jako v případě modulu pružnosti je zaznamenán výrazný pokles pevnosti u všech vzorků, které podléhaly hydrolytické stabilitě. Chybové úsečky jsou natolik velké, že se pás možných hodnot překrývá u všech referenčních vzorků kompozitů, podobně se jeví i hodnoty vzorků podrobených testu hydrolytické stability.



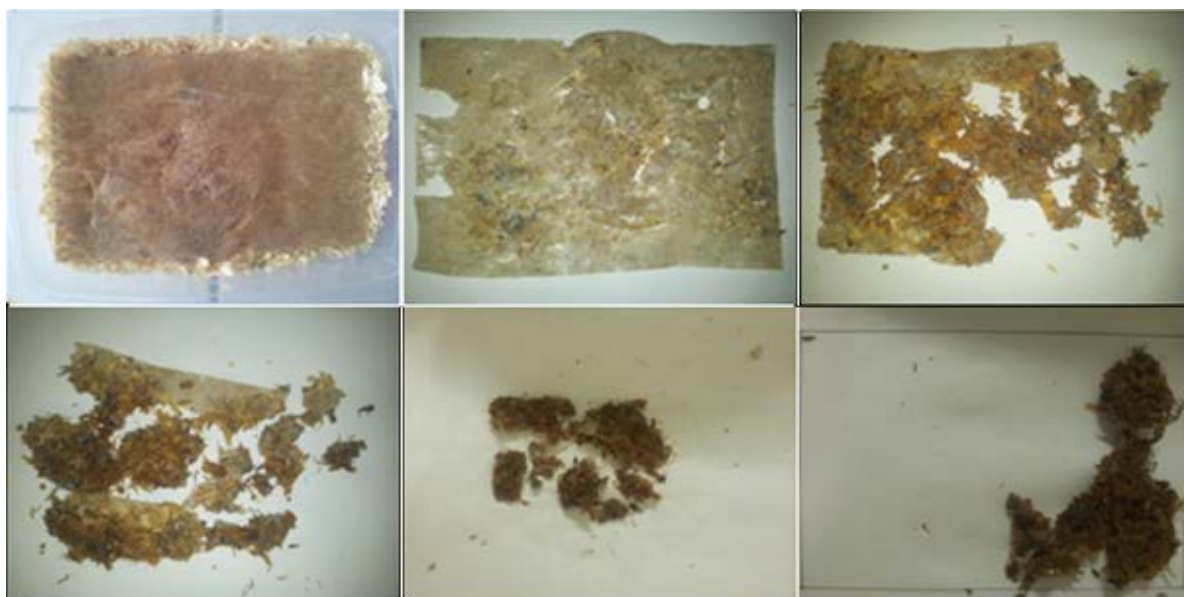
Obrázek 18: Srovnání pevnosti v tahu

Na obrázku 19 lze vidět, že vodné prostředí způsobilo vyšší hodnoty tažnosti kompozitů. Nejvýraznější efekt tohoto nárůstu byl pozorován u vzorku 30%\_F\_silan1.



Obrázek 19: Srovnání tažností kompozitních materiálů

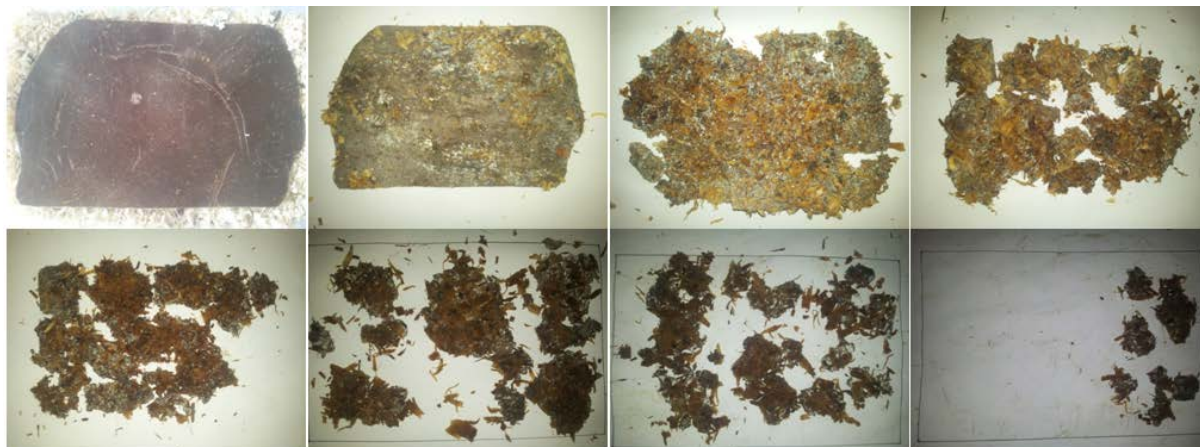
Na vylisovaných fóliích byla testována biodegradace kompostováním dle kapitoly 3.6. Stupeň degradace na všech fóliích byl kontrolován 1., 5., 12., 19., 22., 26., 29., 32., 35., 39., 42. a 46. den od založení testu. Kompost v průběhu testu měnil barvu. Nejdříve měl barvu pilin, tedy světle žlutou, 5. den už byl tmavě žlutý. Okolo 10. dne byl kompost už hnědý, od 20. dne měl kompost tmavě hnědou barvu.



Obrázek 20: Průběh biodegradace kompozitu 25%\_F\_NaOH

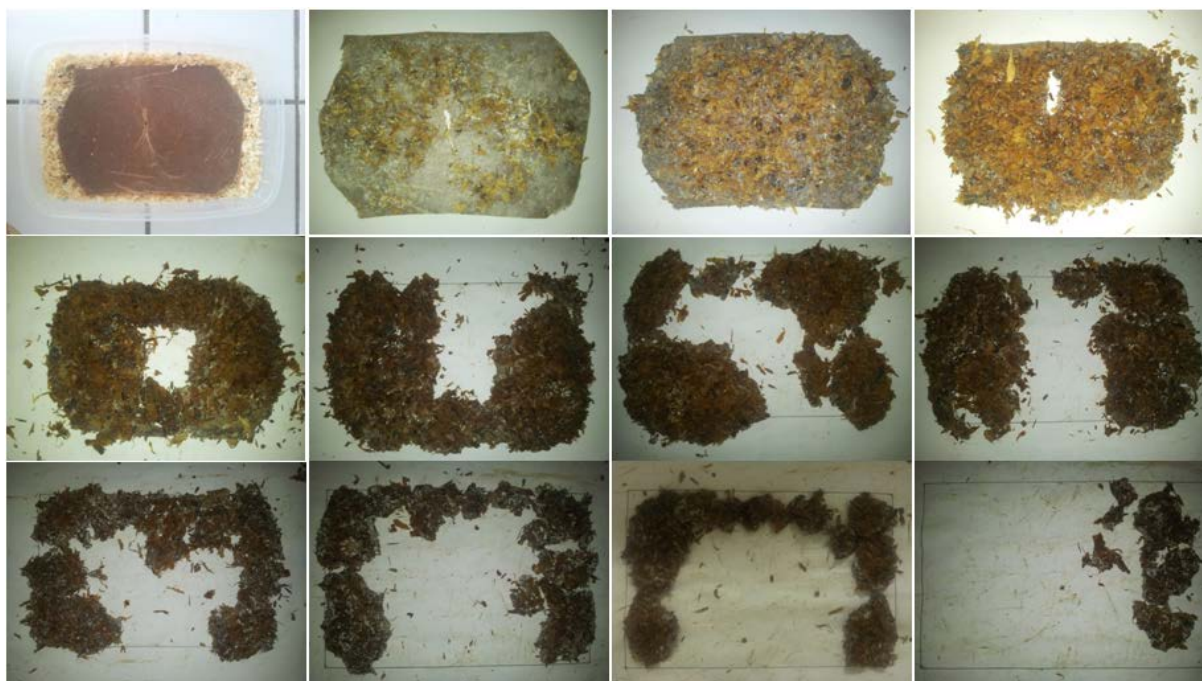
Fólie na obrázku 20 byla jediná s menším obsahem vláken, obsahuje 25 obj. % upravených vláken v roztoku NaOH. Fólie byla nejtenčí, přibližně 0,2 mm. Hmotnost vkládané fólie byla 2,851 g. Už při vkládání byla křehká. 5. den už byla fólie mírně degradovaná, především po okrajích a v místech, kde byla fólie poškozená. 12. den nebyla fólie už v kompaktní formě. Zbývalo z ní přibližně 70 %. 15. den už byly nalezeny pouze části fólie, především původní

okraje. Okraje zůstaly kvůli špatnému zavlažování kompostu, které bylo prováděno spíše uprostřed. Z původní velikosti zbývalo přibližně 40%. 19. den v kompostu už byly nalezeny pouze malé kusy fólie, které byly mohutně obaleny zralým kompostem. Malé kusy fólie tvořily přibližně 25 % původní velikosti. 22. kontrolní den z fólie zbývalo přibližně 18 %. 26. den byl test ukončen, v kompostu nebyly nalezeny žádné části fólie.



*Obrázek 21: Průběh degradace kompozitu 30%\_F\_ref*

Fólie s neupravenými vlákny byla 1. den pevná o přibližné tloušťce 0,4 mm. Hmotnost vkládané fólie byla 6,306 g. Už 5. den se tato fólie výrazně ztenčila a při přesunu na papír se ohýbala. 12. den fólie nebyla v celku, degradace se projevila především po okrajích. 15. den už byly nalezeny pouze menší části původní fólie, přibližně 80 %. 19. kontrolní den byly malé kusy zbylé fólie tmavší, více obalené zrajícím kompostem a bylo jich o poznání méně. Z fólie zbývá 60 %. 22. den se fólie rozpadla na ještě menší kusy obalené kompostem, z původní velikosti zbývalo 35 – 40 %. 26. den z fólie zbylo 20 %. Degradace probíhala rychleji než předchozí dny. 29. den byly nalezeny pouze malé kousky fólie. 32. kontrolní den byl test dokončen.



*Obrázek 22: Průběh degradace kompozitu 30%\_F\_silan1*

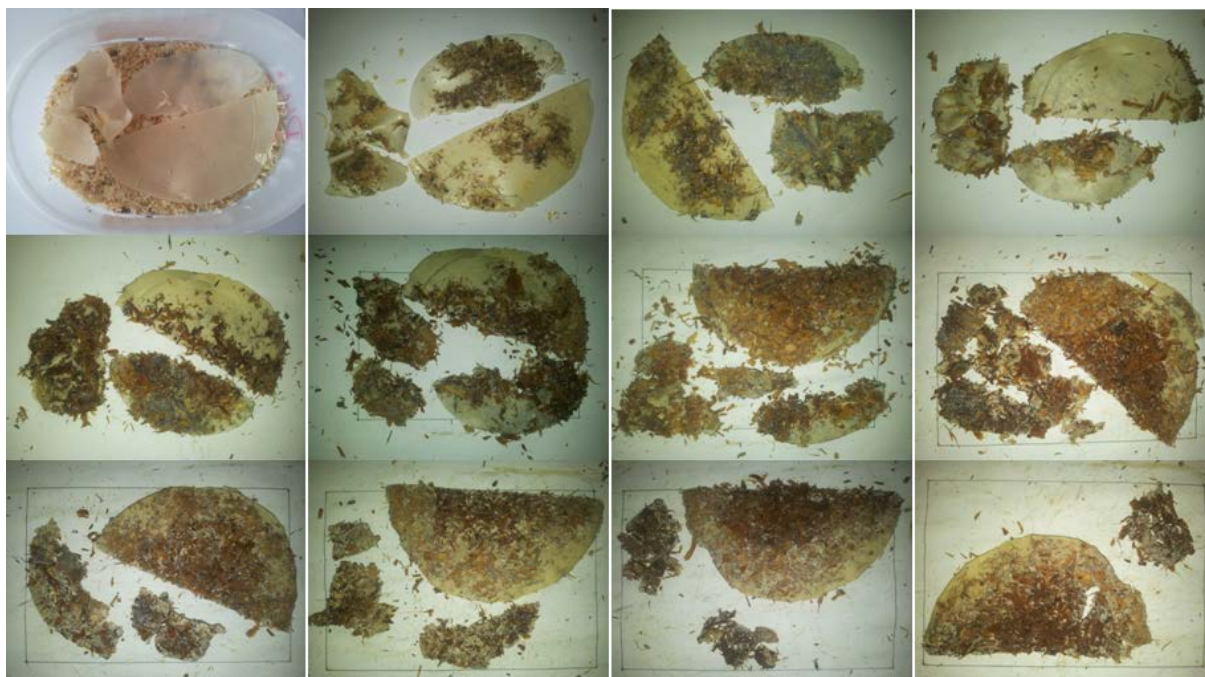


Vkládaná fólie 30%\_F\_silan1 měla už od začátku uprostřed menší díru a okolo ní byly výrazné vrypy. Fólie měla tloušťku přibližně 0,4 mm a hmotnost 7,023 g. 5. den byl na fólii přilepený kompost, bylo zpozorováno zvětšení původní díry. 12. den bylo na fólii nalepeno mnohem více zrajícího kompostu, ale také byla fólie výrazně tenčí a byla pozorována degradace na okrajích v malé míře. 15. den už fólie na okrajích degradovala, byla ještě o trochu tenčí a zvětšila se původní díra asi 15krát. 19. den nebylo možné fólii vytáhnout v celku, rozpadala se, díra uprostřed se zvětšila, chybělo minimálně 10 % původní velikosti. 22. kontrolní den už chybělo 20 % fólie, rozpadla se malé kusy, které byly okolo díry. 26. den chybělo 30 % kompozitu. Degradace do dalšího kontrolního dne byla pomalá a 29. den chybělo 35 % původního materiálu. 32. den chybělo 47 % fólie. Rozklad fólie pokračoval v následujících dnech rychle, 35. den zbývalo 35 % původní velikosti, 39. den už bylo pouze 20 % fólie. 42. kontrolní den chybělo 93 % materiálu, následující 46. den byl test ukončen, fólie byla degradovaná.



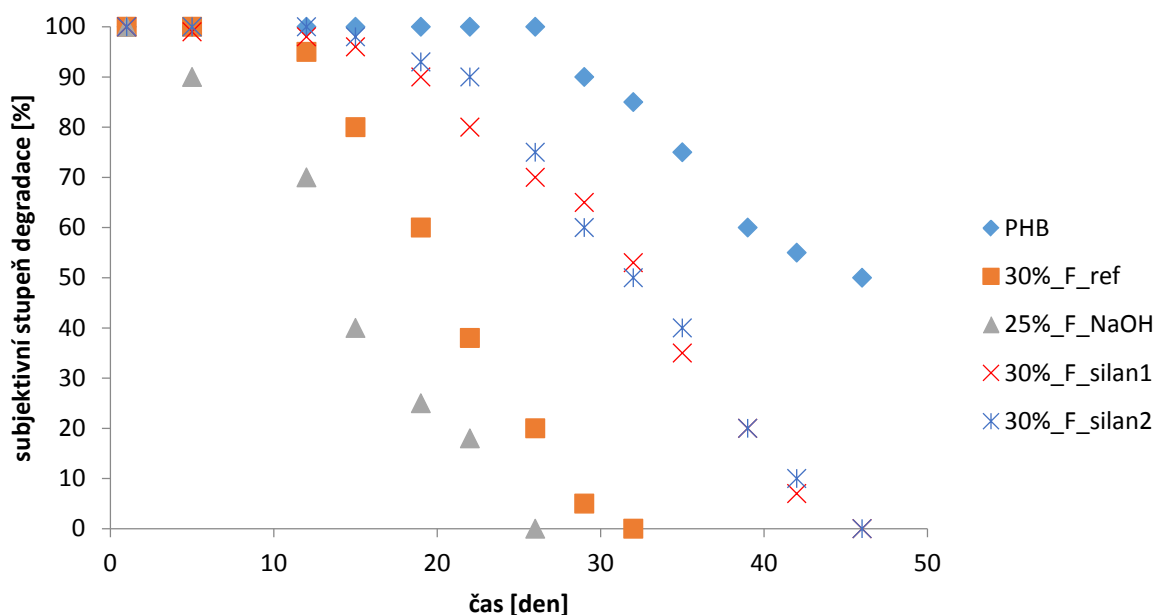
Obrázek 23: Průběh degradace kompozitu 30%\_F\_silan2

Testovaná fólie 30%\_F\_silan2 obsahovala pár nerozmíchaných kousků vláken a pravý okraj byl roztřepený. Původní hmotnost fólie byla 8,060 g o přibližné tloušťce 0,4 mm. 5. den fólie vypadala podobně jako 1. den, bylo na ní trošku přilepeného kompostu. Stále byla pevná, šířka byla také pravděpodobně stejná. 12. den bylo na fólii hodně přilepeného kompostu, fólie byla trošičku užší, po okrajích začínala degradace. 15. den byla fólie na okrajích degradována a byla křehčí. 19. den nebylo možné fólii přenést v celku, byla velmi křehká a začala se rozpadat na menší části, chybělo přibližně 5 – 10 %. 22. kontrolní den byla fólie ještě křehčí, zbývalo 90 % původní velikosti. 26. den chybělo 25 % původní velikosti. 29. den chybělo už 40 % fólie, materiál začal degradovat rychle. Jeden kousek byl pevnější, ostatní byly velice křehké. 32. kontrolní den chybělo 50 % kompozitního materiálu. 35. den zbývalo 40 % fólie. 39. den bylo nalezeno pouze 20 % fólie. 42. kontrolní den už zbývalo pouze 10 % materiálu. 46. den byl test ukončen.



*Obrázek 24: Průběh degradace čistého PHB*

Vylisované fólie z čistého PHB mají různé tloušťky, půlkruhová má přibližně 0,6 mm a dva menší pokroucené kousky mají cca 0,2 mm. Celková hmotnost vkládaného materiálu byla 7,365 g. Při 5. kontrolním dnu nedošlo k výrazným změnám, na pár místech byl přilepen zrající kompost. 12. a 15. den také nebyly pozorovány větší změny, oproti předchozím dnům byly na fóliích větší kusy zrajícího kompostu. 19. den je nejmenší fólie pravděpodobně křehčí a po okrajích začíná degradovat, největší a nejtlustší fólie byla rozměrově stálá. 22. den se nejmenší kousek rozdělil na dva kousky, kde bylo pravděpodobně nejtenčí místo. Větší kousek PHB byl tenčí, byla pozorována začínající degradace na okrajích. Největší kus PHB byl trošku křehčí, více obalený zrajícím kompostem. 26. kontrolní den byl nejmenší kousek fólie rozpadlý na přibližně 6 malých kousků, prostřední kousek byl rozpadlý na 2 kousky. Původně dvě nejmenší vložené fólie jsou o 50 % tenčí. Od největšího kusu fólie se odtrhl okraj, kde byl původně vryp. 29. kontrolní den chybělo přibližně 10 % fólie. 32. den zbývalo 85 % původního materiálu. Fólie byla degradována pouze na menších fóliích, největší kus fólie byl pouze tenčí. 35. den zbývalo 75 % původního materiálu, degradovány jsou pouze tenčí fólie. Největší vkládaná fólie je stále pevná. 39. kontrolní den zbývalo pouze 40 % materiálu, degradace se stále projevuje pouze na nejtenčích fóliích. 42. den bylo nalezeno pouze 55 % materiálu. Na největší fólii je pozorován začátek degradace na okrajích a zároveň došlo k částečnému rozpadu materiálu. 46. kontrolní den zbylo 50 %, tenké fólie jsou tedy už rozpadlé a zbývá pouze největší fólie, na které je degradace v začátcích.



Obrázek 25: Subjektivní stupeň degradace

Z důvodu grafického znázornění průběhu biodegradace jednotlivých kompozitů byl sestaven graf, na jehož ose y byl vynášen subjektivní stupeň degradace v závislosti na čase. Hodnota odráží velikost vzorku a soudržnost materiálu. Tloušťka vzorku není v grafickém znázornění zahrnuta, v průběhu dochází k neustálému ztenčování materiálu. Než samotný vzorek začne měnit svoji velikost, musí nejdříve dosáhnout určité tloušťky (cca 0,1 mm). U každé fólie se biodegradace projevovала jinou rychlostí. Z obrázku 25 je patrné, že nejrychleji degradovaný kompozit byl 25%\_F\_NaOH, následoval 30%\_F\_ref. Je možné, že pokud by byla fólie z 25%\_F\_NaOH stejně tlustá jako ostatní, tak by biodegradace probíhala déle. U všech ostatních fólií nejdříve muselo dojít k ztenčení fólie a až následné biodegradaci viditelné ve změně velikosti vnějších okrajů. Nejrychlejší degradace z fólií, které obsahují 30 obj. % vláken, byla fólie s neupravenými vlákny. Následně začal degradovat kompozit 30%\_F\_silan1, nejvíce tedy odolával 30%\_F\_silan2. Fólie z čistého PHB biodegradaci odolávala nejdéle, pomalejší degradace je ovlivněna největší tloušťkou fólie. Tenčí vkládané dva kusy fólie z čistého PHB degradovali jen trochu pomaleji než fólie s 30 obj. % vláken, upravených pomocí silanů. Z naměřených hodnot lze usoudit, že celulózová vlákna s variabilní úpravou povrchu mohou sloužit nejen jako výztuž v kompozitním materiálu, ale i jako řízený promotor biodegradace biokompozitu.



## 5 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byly připraveny kompozitní materiály na bázi přírodních lněných krátkých vláken a matrice PHB. Byl studován vliv kompatibilizace povrchu těchto vláken a matrice s ohledem na biodegradabilitu a hydrolytickou stabilitu. Ke kompatibilizaci povrchu vláken byly použity 3 postupy: úprava mercerizací v NaOH, vlákna upravená mercerizací byla následně silanizována dvěma činidly s odlišnou reaktivní skupinou – methakrylovou a glycidyllovou. Kompozitní materiály byly připraveny zahrnutím vláken do taveniny PHB o objemovém zlomku výztuže zpravidla 30 %. Kompozity byly následně vylišovány do formy fólií. Z části fólie byly připraveny výsekem testovací tělesa ve tvaru dog-bone. Vzorky byly podrobeny orientační analýze mechanických vlastností a testu biodegradace kompostováním.

Všechny připravené kompozitní materiály jsou biodegradabilní. Biodegradaci výrazně urychluje přítomnost vláken v PHB. Samotná fólie z PHB degradovala podstatně pomaleji, náznaky změn byly okem viditelné až po 25 dnech. Za podmínek v experimentu nejdříve degradoval kompozit 25%\_F\_NaOH, tloušťka fólie však byla v porovnání s ostatními výrazně tenčí. Pokud by byla jejich tloušťka stejná jako u ostatních, pravděpodobně by došlo k nejrychlejšímu rozkladu u kompozitu 30%\_F\_ref. Domněnka vyplývá z analogie získané měřením nasákavosti a hydrolytické stability, kde 25%\_F\_NaOH degraduje pomaleji než vzorky s 30 obj. % vláken. Tvrzení je však potřeba experimentálně ověřit. Biodegradace u kompozitů, které měly vlákna upravená pomocí silanů, byla srovnatelná a jejich biologický rozpad probíhá přibližně dvojnásobnou rychlostí než u čistého PHB a poloviční rychlostí oproti kompozitům s úpravou NaOH.

Kompozitní materiály se od sebe v mechanických vlastnostech nijak výrazně nelišily. Avšak nejvyšší pevnosti i modulu pružnosti dosáhl kompozit s 30 obj. % vláken silanizovaných glycidyloxopropyltrimethoxysilanem. Ze zkoušky nasákavosti a hydrolytické stability vyplynulo, že všechny materiály podléhaly sorpci vlhkosti ve vodném prostředí a byl zaznamenán výrazný pokles modulu pružnosti i pevnosti v tahu. Molekuly vody na rozhraní matrice a vlákna způsobila také vyšší tažnost materiálu. Z výsledků práce lze konstatovat, že lněná vlákna s vhodně zvolenou úpravou mohou sloužit k řízení rychlosti biodegradability biokompozitů na bázi PHB.



## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [2] COLBY, Michael Rubinstein and Ralph H. *Polymer physics* [online]. Oxford: Oxford University Press, 2003 [cit. 2015-04-13]. ISBN 978-161-3449-431. Dostupné z: [https://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpPP000001/cid:kt00A5AKE1/viewerType:pdf/root\\_slug:polymer-physics?cid=kt00A5AKE1&page=2&b-q=progress%20in%20polymer%20science&sort\\_on=default&b-subscription=TRUE&b-group-by=true&b-search-type=tech-reference&b-sort-on=default&q=progress%20in%20polymer%20science](https://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpPP000001/cid:kt00A5AKE1/viewerType:pdf/root_slug:polymer-physics?cid=kt00A5AKE1&page=2&b-q=progress%20in%20polymer%20science&sort_on=default&b-subscription=TRUE&b-group-by=true&b-search-type=tech-reference&b-sort-on=default&q=progress%20in%20polymer%20science)
- [3] *Produkce plastů*. 2009, 14 s. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/tzn/c1/ZPL1.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c1/ZPL1.pdf)
- [4] KRŽAN, Andrej. *Biodegradovatelné polyméry a plasty*. 2013, 8 s. Dostupné z: [http://www.plastice.org/fileadmin/files/SK\\_Biorazgradljiva\\_plastika\\_in\\_polimeri\\_Krzan.pdf](http://www.plastice.org/fileadmin/files/SK_Biorazgradljiva_plastika_in_polimeri_Krzan.pdf)
- [5] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. ISBN 80-708-0568-4.
- [6] POLÁČEK, Petr. 2014. *Kompozitní materiály a jejich technologie I*.
- [7] UMI ČVUT. Kompozitní materiály [online]. [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/files/6\\_kompozitni-materialy.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/files/6_kompozitni-materialy.pdf)
- [8] EDITORS, A. *Handbook of polymer blends and composites* [online]. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire [England]: Rapra Technology, 2002 [cit. 2014-12-04]. ISBN 978-160-1196-668.
- [9] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [10] *Biodegradable and sustainable fibres*. Editor R Blackburn. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005, 456 s. ISBN 18-557-3916-X.
- [11] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Advanced thermoplastic composites: characterization and processing*. V ČR 1. vyd. Munich: Hanser, c1993, 370 s. ISBN 34-461-7028-6.
- [12] GEORGE, Jayamol, M. S. SREEKALA a Sabu THOMAS. A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polymer Engineering* [online]. 2001, vol. 41, issue 9, s. 1471-1485 [cit. 2014-12-06]. DOI: 10.1002/pen.10846. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pen.10846>
- [13] KABIR, M.M., H. WANG, K.T. LAU a F. CARDONA. Chemical treatments on plant-based natural fiber reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2012, vol. 43, issue 7, s. 2883-2892 [cit. 2014-12-06]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.04.053. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812002922>
- [14] LI, Xue, Lope G. TABIL a Satyanarayan PANIGRAHI. Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review. *Journal of Polymers and the Environment* [online]. 2007-2-17, vol. 15, issue 1, s. 25-33 [cit. 2014-12-06]. DOI: 10.1007/s10924-006-0042-3. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10924-006-0042-3>

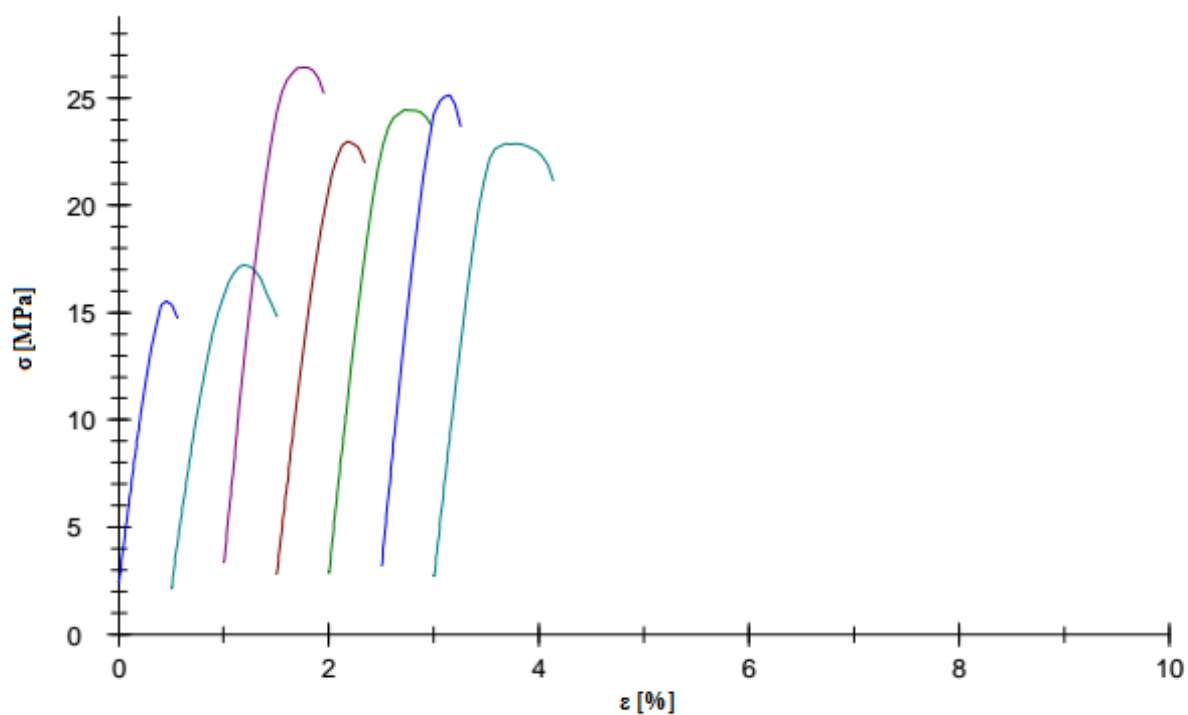
- [15] XIE, Yanjun, Callum A.S. HILL, Zefang XIAO, Holger MILITZ a Carsten MAI. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010, vol. 41, issue 7, s. 806-819. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.03.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X10000850>
- [16] GEORGE, Jayamol, M. S. SREEKALA a Sabu THOMAS. A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polymer Engineering* [online]. 2001, vol. 41, issue 9, s. 1471-1485 [cit. 2015-04-28]. DOI: 10.1002/pen.10846. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pen.10846>
- [17] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 1995, 354 s. ISBN 80-708-0241-3.
- [18] ŠPRAJCAR, Maša, Petra HORVAT a Andrej KRŽAN. *Biopolyméry a bioplasty: Plasty harmonické s přírodou*. 2012, 32 s.
- [19] BARKOULA, N.M., S.K. GARKHAIL a T. PEIJS. Biodegradable composites based on flax/polyhydroxybutyrate and its copolymer with hydroxyvalerate. *Industrial Crops and Products* [online]. 2010, vol. 31, issue 1, s. 34-42 [cit. 2014-12-05]. DOI: 10.1016/j.indcrop.2009.08.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926669009001307>
- [20] Polylactic acid. 2012. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid)
- [21] *Biodegradace*. 2013. 3 s. Dostupné také z: <http://fzp.ujep.cz/~trogl/1Mikr11Biodegradace.pdf>
- [22] SLEJŠKA, Antonín. Testování biodegradability (1997). *Biom* [online]. 1997 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: [http://stary.biom.cz/clen/as/biodegr\\_test.html](http://stary.biom.cz/clen/as/biodegr_test.html)
- [23] ASTM D570-98(2010)e1, Standard Test Method for Water Absorption of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [24] ASSARAR, M., D. SCIDA, A. EL MAHI, C. POILÂNE a R. AYAD. Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of reinforced composite materials: Flax-fibres and glass-fibres. *Materials* [online]. 2011, vol. 32, issue 2, s. 788-795 [cit. 2014-12-21]. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.07.024. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306910004590>
- [25] ČSN EN ISO 527-1 (640604). *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy*. Zlín: Institut pro testování a certifikaci a. s., 2012.
- [26] *Technical Data Sheet & Processing Guide: ENMAT Thermoplastics Resin Y100P*. 2011.
- [27] *XIAMETER® OFS-6040 Silane: Coupling agent to improve adhesion of organic resins to inorganic surfaces*. 2011.
- [28] *SIGMA-ALDRICH: (3-Glycidyloxypropyl)trimethoxysilane*. 2015. Dostupné také z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/440167?lang=en&ion=CZ>
- [29] *SIGMA-ALDRICH: 3-(Trimethoxysilyl)propyl methacrylate*. 2015. Dostupné také z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/440159?lang=en&ion=CZ>

- [30] IS/ISO 20200: 2004. *PLASTICS - DETERMINATION OF THE DEGREE OF DISINTEGRATION OF PLASTIC MATERIALS UNDER SIMULATED COMPOSTING CONDITIONS IN A LABORATORY-SCALE TEST*. New delhi: Bureauofindianstandards, 2009. Dostupné z: <https://law.resource.org/pub/in/bis/S11/is.iso.20200.2004.pdf>

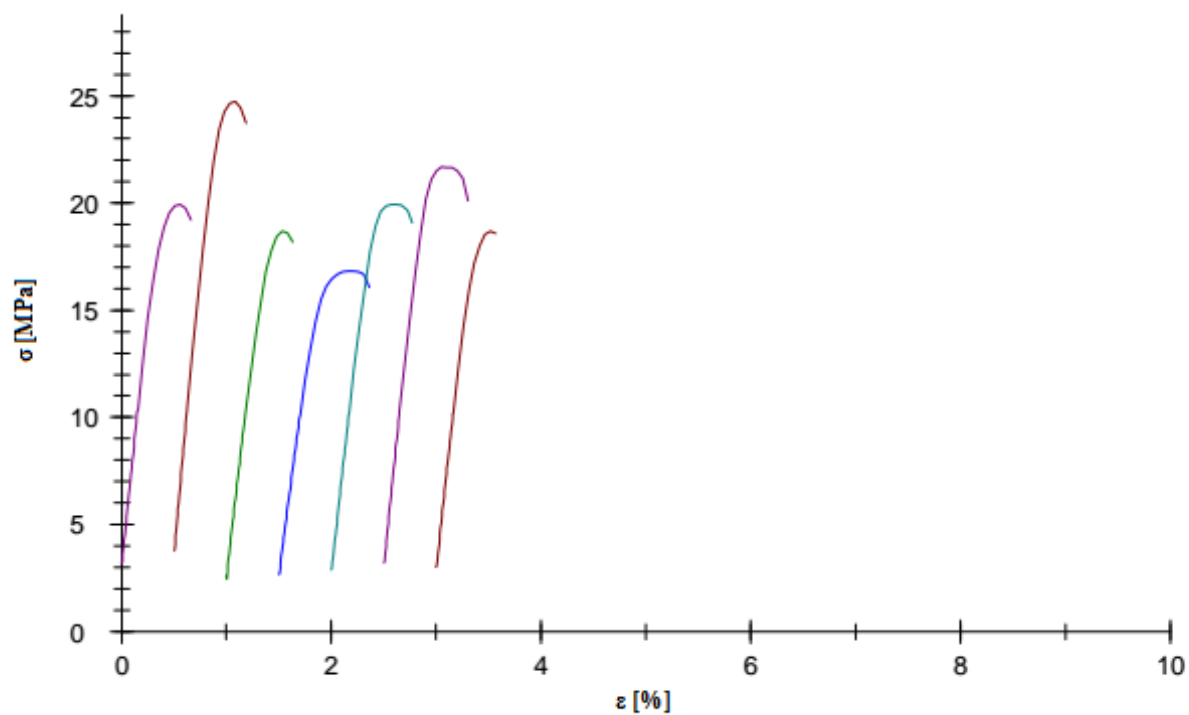
## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

PHA	polyhydroxyalkanoát
PHB	polyhydroxybutyrát
PLA	kyselina polymléčná
PP	polypropylen
PE	polyethylen
PA	polyamid
PS	polystyren
PMMA	polymethylmethakrylát
$\sigma$	zatěžující napětí
E	modul pružnosti
$\varepsilon$	relativní deformace

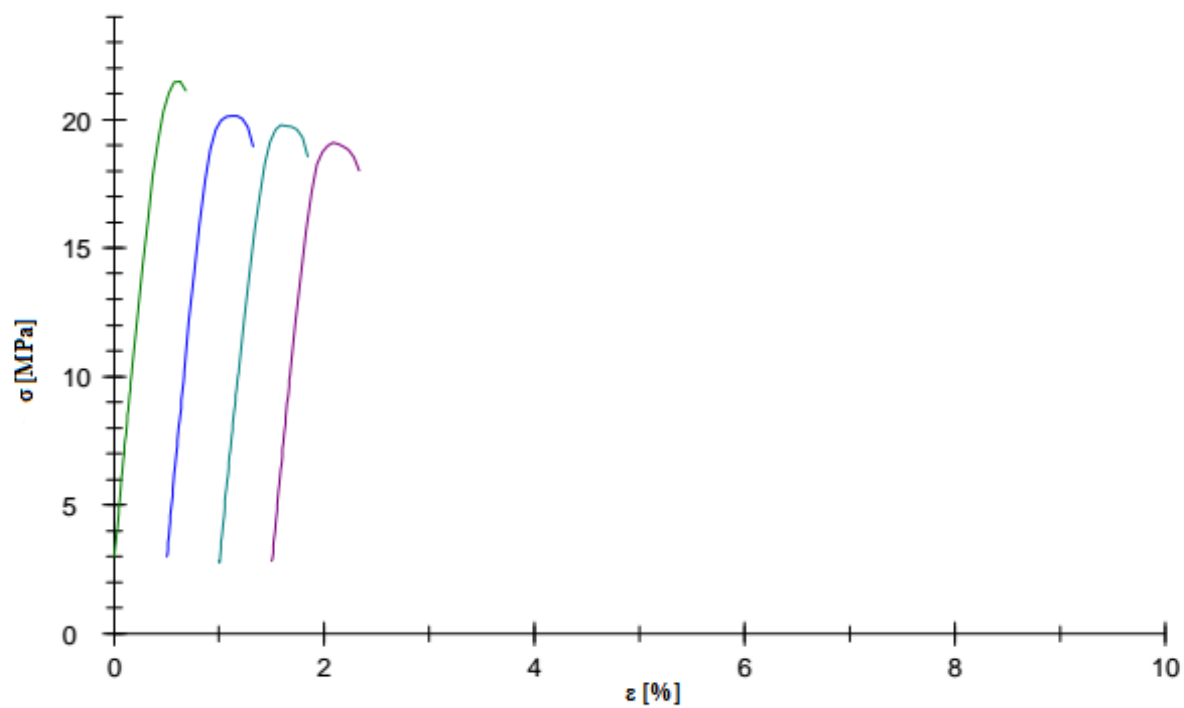
## 8 PŘÍLOHY



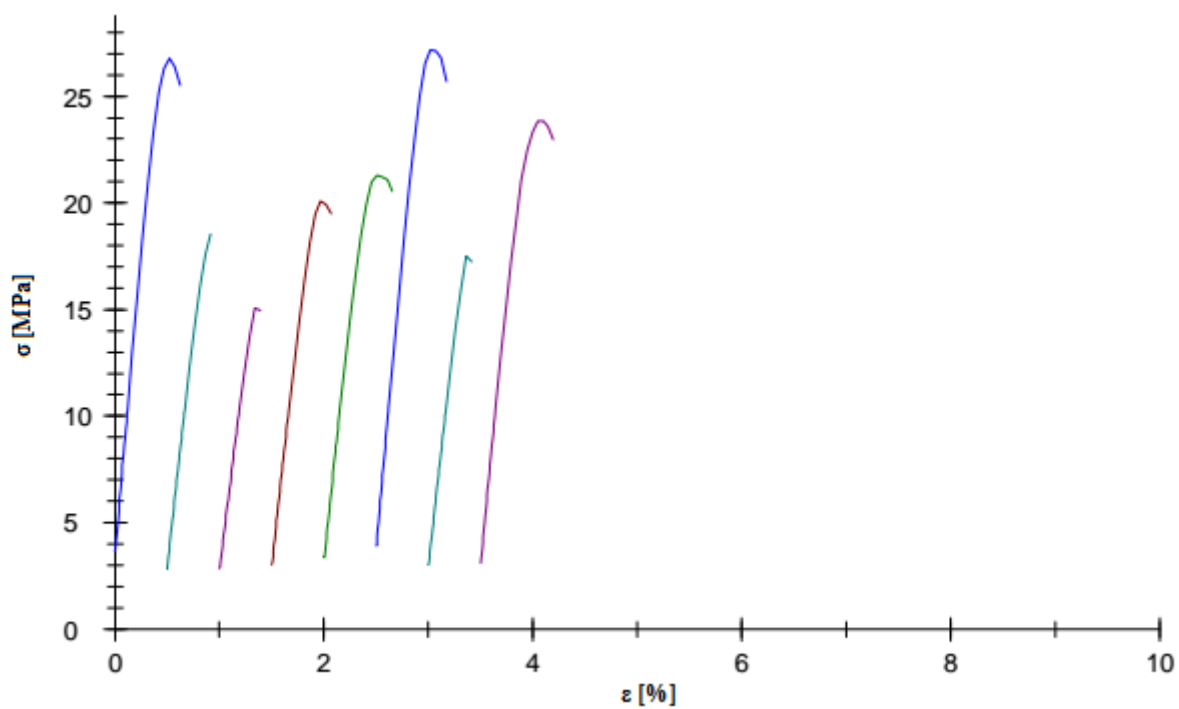
Obrázek 26: Tahová křivka kompozitu s označením 20%\_F\_ref



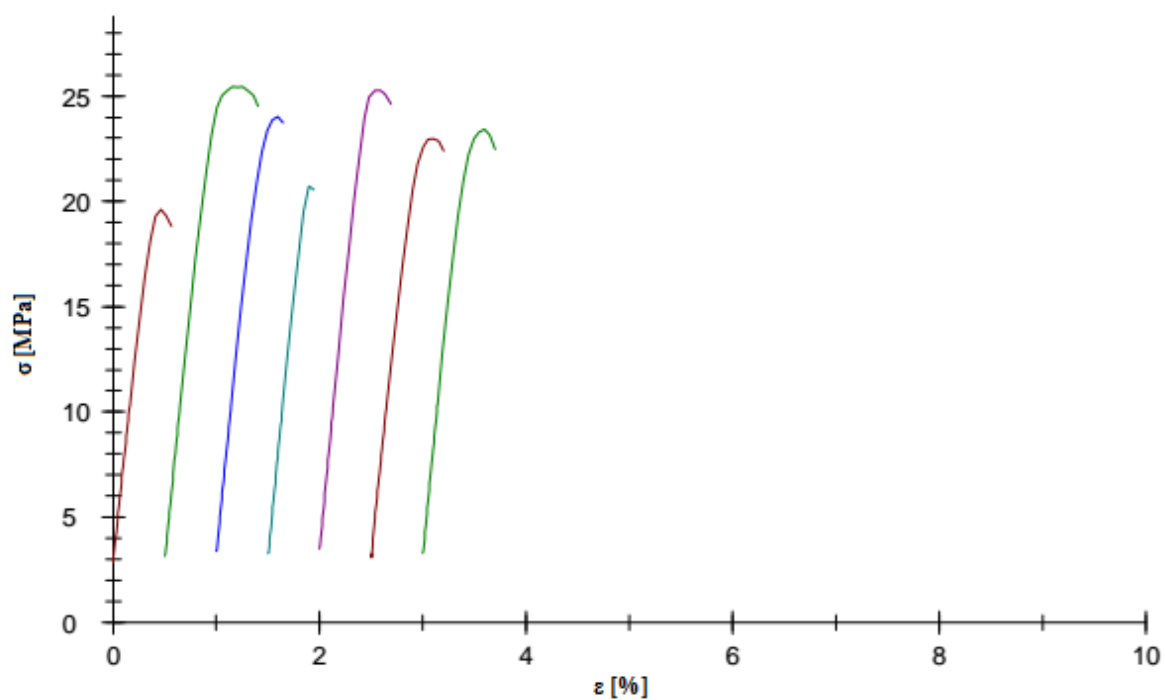
Obrázek 27: Tahová křivka kompozitu s označením 30%\_F\_ref



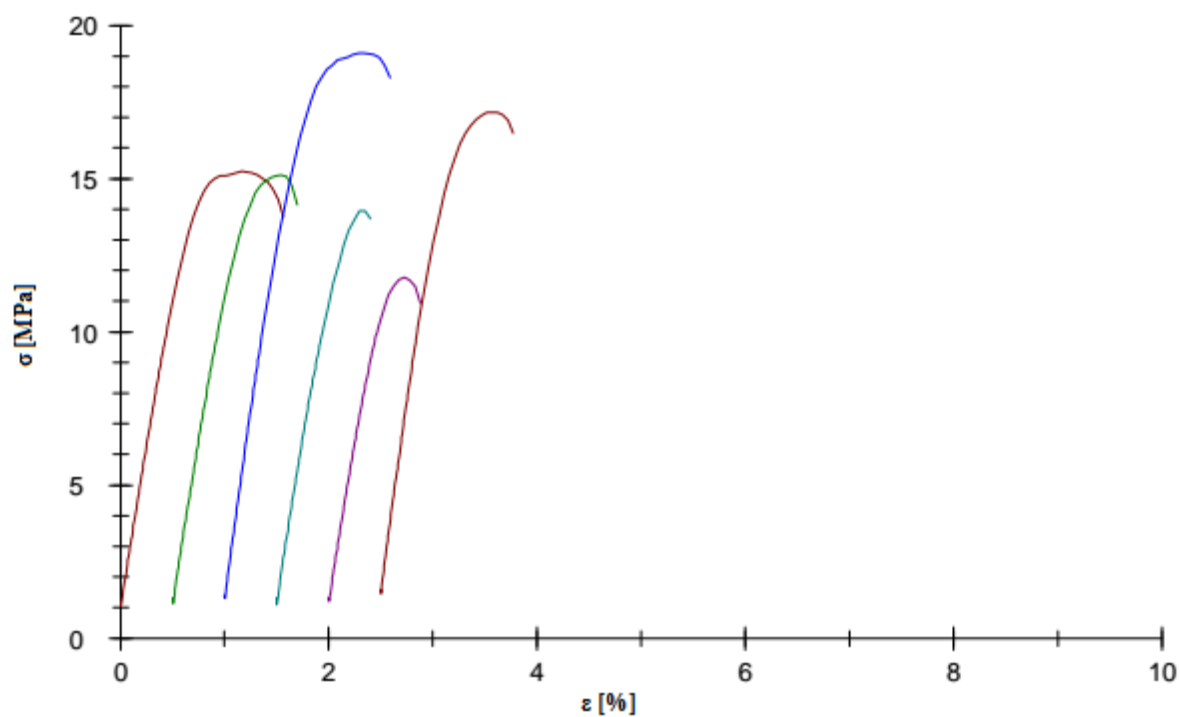
Obrázek 28: Tahová křivka kompozitu s označením 25%\_F\_NaOH



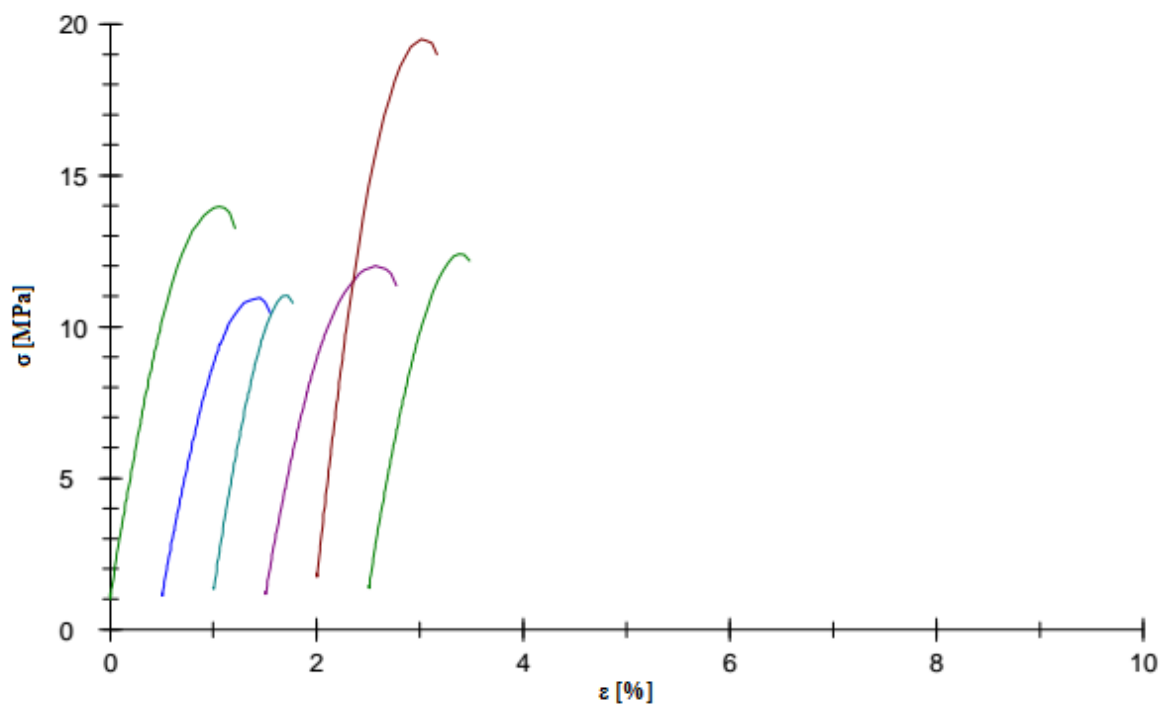
Obrázek 29: Tahová křivka kompozitu s označením 30%\_F\_silan1



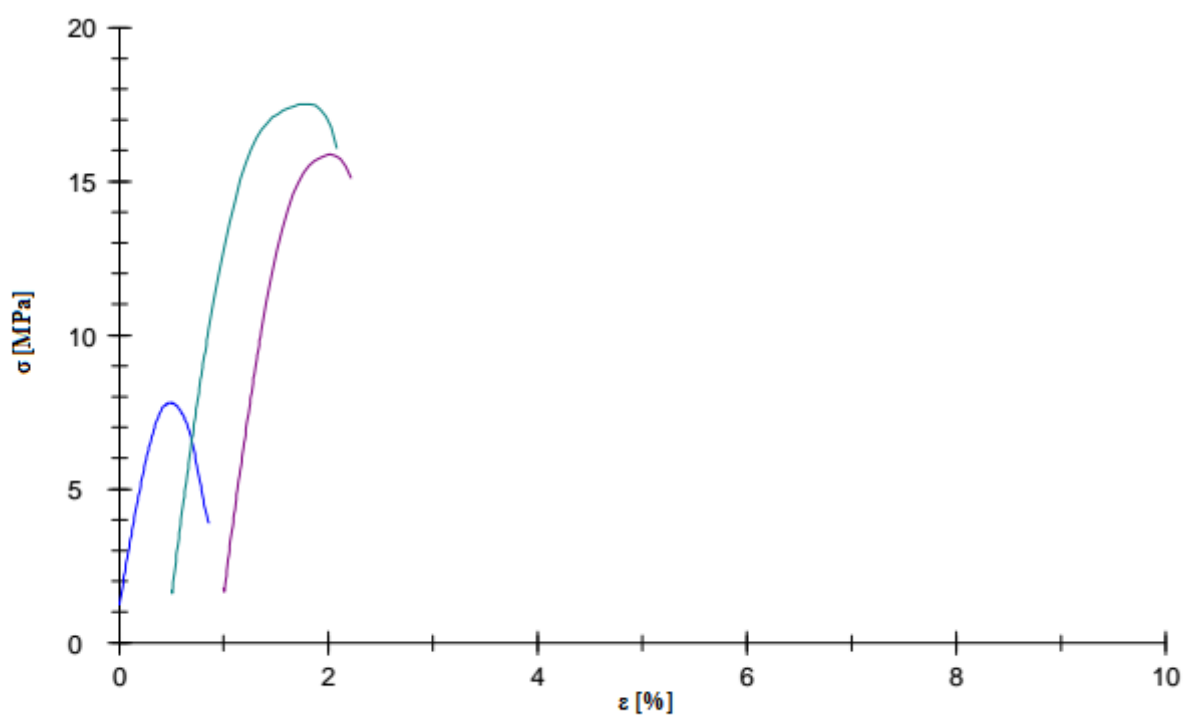
Obrázek 30: Tahová křivka kompozitu s označením 30%\_F\_silan2



Obrázek 31: Tahová křivka kompozitu s označením 20%\_F\_ref (voda)

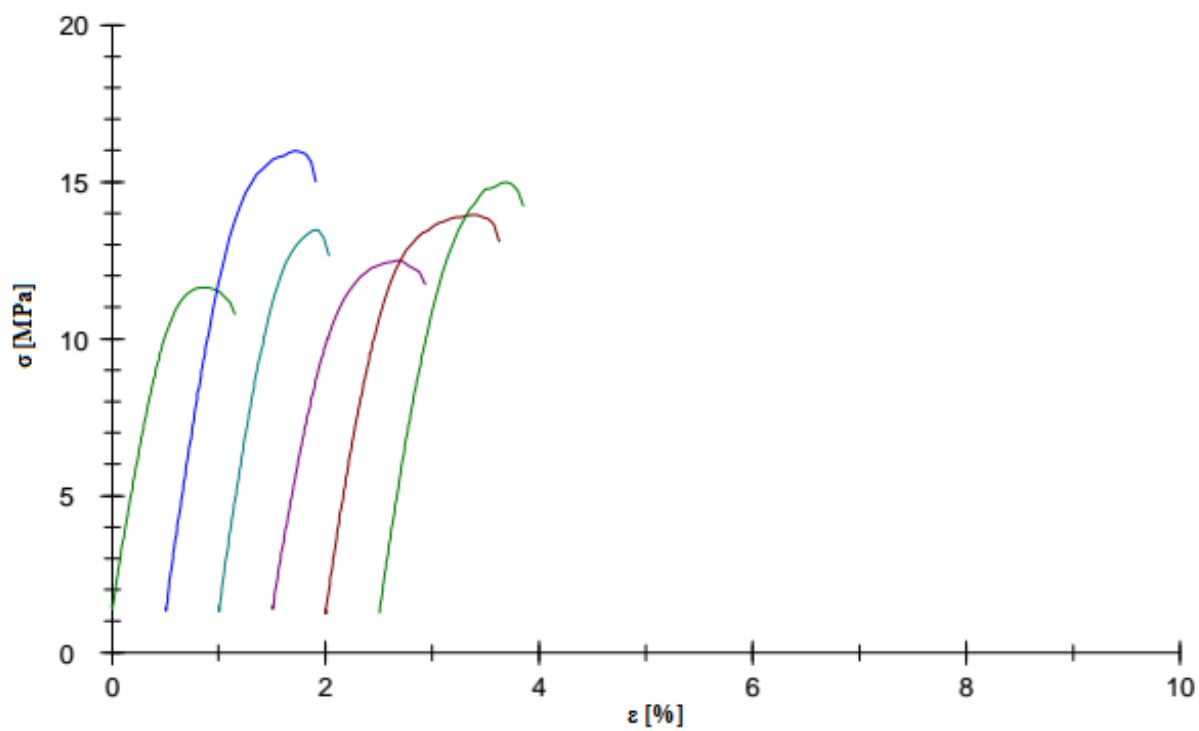


Obrázek 32: Tahová křivka kompozitu s označením 30%\_F\_ref (voda)

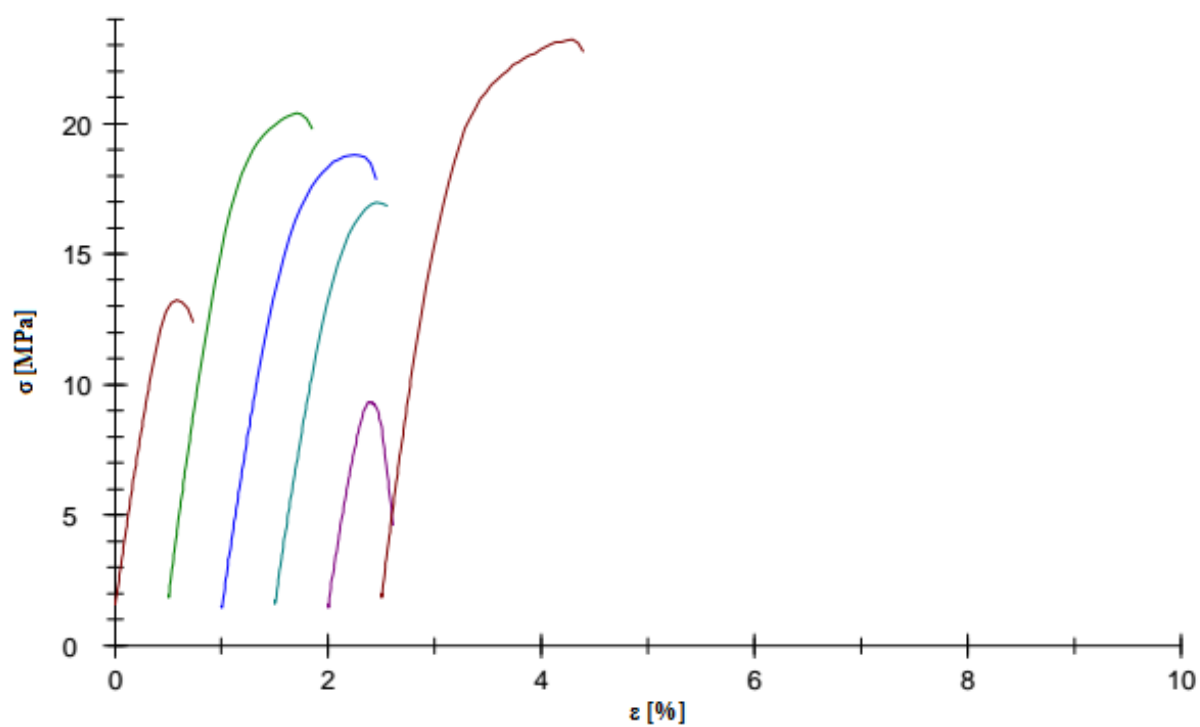


Obrázek 33: Tahová křivka kompozitu s označením 25%\_F\_NaOH (voda)





Obrázek 34: Tahová křivka kompozitu s označením 30%\_F\_silan1 (voda)



Obrázek 35: Tahová křivka kompozitu s označením 30%\_F\_silan2 (voda)



Obrázek 36: Vysekané dog-bone typu 5B